



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM CONJUNTO
DE ÁRVORES PRÓXIMAS:
UM ESTUDO QUALITATIVO DAS COPAS E RAÍZES E
EQUIVALÊNCIA COM A GAIOLA DE FARADAY**

Arthur Breciani dos Santos Marques Taveira

Brasília, julho de 2017

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UnB

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica

Arthur Breciani dos Santos Marques Taveira

**DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM CONJUNTO
DE ÁRVORES PRÓXIMAS:
UM ESTUDO QUALITATIVO DAS COPAS E RAÍZES E
EQUIVALÊNCIA COM A GAIOLA DE FARADAY**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao
Departamento de Engenharia Elétrica da
Universidade de Brasília como requisito parcial
para obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia Elétrica.

Orientador: Professor Alcides Leandro da Silva, Dr.

Brasília, julho de 2017

FICHA CATALOGRÁFICA

TAVEIRA, Arthur Breciani dos Santos Marques (aluno).

Descargas atmosféricas em conjunto de árvores próximas: um estudo qualitativo das copas e raízes e equivalência com a gaiola de Faraday [Distrito Federal] 2017.

XIII, 73 p. (ENE/FT/UnB, Graduação, Engenharia Elétrica, 2016).

Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade de Brasília.

Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Elétrica. Brasília, 2017.

Orientação: Dr. Prof. Alcides Leandro da Silva.

1. Descarga atmosférica

2. Raios em árvores

3. Gaiola de Faraday

4. Copas e raízes

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Taveira, Arthur Breciani dos Santos Marques (2017). Descargas atmosféricas em conjunto de árvores próximas: um estudo qualitativo das copas e raízes e equivalência com a gaiola de Faraday. Trabalho de Conclusão de Curso, Publicação, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 71 páginas.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Arthur Breciani dos Santos Marques Taveira.

TÍTULO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO: Descargas atmosféricas em conjunto de árvores próximas: um estudo qualitativo das copas e raízes e equivalência com a gaiola de Faraday

GRAU/ANO: Graduação em Engenharia Elétrica/2017.

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta monografia do Trabalho de Conclusão de Curso e emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia do Trabalho de Conclusão de Curso pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Arthur Breciani dos Santos Marques Taveira
QI 8 conjunto I casa 134, 71010-095, Guará 1, DF, Brasil.
arthurabsmt@hotmail.com

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM CONJUNTO DE ÁRVORES PRÓXIMAS: UM ESTUDO QUALITATIVO DAS COPAS E RAÍZES E EQUIVALÊNCIA COM A GAIOLA DE FARADAY

Arthur Breciani dos Santos Marques Taveira

Banca examinadora

Prof. Dr. Alcides Leandro da Silva, UnB/ENE

Orientador

Prof. Dr. Franklin da Costa Silva, UnB/ENE

Examinador interno

Eng. Renato Fernandes Moraes

Examinador externo

Brasília, julho de 2017

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a José Bezerra
dos Santos (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por ter me mostrado o caminho em meio às dificuldades e por me dar forças quando eu mesmo não acreditava que iria conseguir.

Agradeço aos meus pais e avós, pela dedicação, esforço, carinho e apoio em todas as etapas de minha formação até chegar aqui.

Agradeço a minha companheira e melhor amiga, Ana Luíza, por estar ao meu lado durante toda essa jornada, me compreendendo e ajudando sempre.

Agradeço ao Prof. Dr. Alcides Leandro da Silva pela oportunidade de realizar esse trabalho e por me orientar e incentivar durante esse desafio.

Agradeço aos meus colegas e amigos que de alguma forma me auxiliaram durante minha jornada.

RESUMO

Descargas atmosféricas, belas suas aparências brilhantes e violentas e assustadoras nos efeitos, equilibram as energias do circuito global e neutralizam parte das cargas elétricas. No Brasil, pela extensão e clima, é um dos países mais bombardeados pelas descargas, tanto no meio urbano, em edificações, quanto no meio rural, em árvores. Este trabalho faz uma análise do comportamento de árvores próximas onde as copas se tocam e as raízes se entrelaçam quando submetidas a raios. Foi elaborada uma comparação entre a Gaiola de Faraday e o circuito equivalente do conjunto de árvores e a criação ou minimização da tensão de passo.

Palavras-chave: descarga atmosférica; raios em árvores; gaiola de Faraday; copas e raízes.

ABSTRACT

Atmospheric discharges, beautiful in their bright appearances and violent and scary in their effects, balance the energies of the global circuit and neutralize part of the electric charges. Brazil, for its vast size and climate, is one of the countries most struck by discharges, both in the buildings of the urban environment, and in the trees of the rural areas. This study analyzes the behavior of nearby trees where the crowns touch and the roots intertwine when subject to lightning. A comparison was made between the Faraday's Cage and the equivalent circuit of the set of trees and the creation or minimization of the step voltage.

Keywords: atmospheric discharge; lightning strikes to trees; Faraday's cage; crowns and roots.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. MOTIVAÇÃO	2
1.2. ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO	4
 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1. ESTRUTURA ELÉTRICA DA ATMOSFÉRICA	5
2.2. CONSTANTE DIELETRICA E RUPTURA DIELETRICA	7
2.3. FORMAÇÃO DAS NUVENS E DE SEUS CAMPOS ELÉTRICOS	8
2.3.1. NUVENS DE TEMPESTADE	12
2.3.2. CONTRIBUIÇÃO DAS ÁRVORES NA FORMAÇÃO DAS NUVENS	12
2.4. FORMAÇÃO DO CANAL DE DESCARGA	12
2.5. CARACTERÍSTICAS DAS DESCARGAS ELÉTRICAS	15
2.6. MÉTODOS DE DETECÇÃO DAS DESCARGAS ELÉTRICAS	19
2.7. CIRCUITO ELÉTRICO ATMOSFÉRICO GLOBAL	21
2.8. NBR 5419 E OS SPDA'S	23
 3. DESCARGA ATMOSFÉRICA EM UMA ÁRVORE	26
3.1. CARACTERÍSTICAS DE UMA ÁRVORE	26
3.2. MODELAGEM ELÉTRICA DE ÁRVORES	29
3.3. A ÁRVORE E AS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	32
3.3.1. ÁRVORE INTACTA	33
3.3.2. PERDA DE CASCA DO TRONCO	34
3.3.3. DESTRUIÇÃO DA ÁRVORE	36
3.4. EXEMPLOS DE ESTUDOS COM SIMULAÇÃO DE DESCARGAS EM ÁRVORES	38
 4. DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM UM CONJUNTO DE ÁRVORES.....	42
4.1. DIFICULDADES DE ESTUDO DO PROBLEMA	42
4.2. ESTUDOS QUE ABORDAM O TEMA	45

5. PROPOSTA DE GAIOLA DE FARADAY CONSTITUÍDA POR	
ÁRVORES	47
6. CONCLUSÃO	53
6.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS DE FUTUROS	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Mapa de densidade de descargas atmosféricas no Brasil	1
Figura 1.2: Mapa da vegetação brasileira	3
Figura 2.1: Divisão elétrica da atmosfera	5
Figura 2.2: Formação de um dipolo elétrico a partir de uma partícula neutra	8
Figura 2.3: Tipos de nuvens	10
Figura 2.4: Esquemático do interior de uma nuvem <i>Cumulonimbus</i>	11
Figura 2.5: Esquemático de uma avalanche de elétrons	13
Figura 2.6: Formação do canal de descarga	14
Figura 2.7: Etapas de formação da descarga atmosférica	15
Figura 2.8: Tipos de descargas atmosféricas	17
Figura 2.9: Corrente pelo tempo de uma descarga descendente negativa	18
Figura 2.10: Modelo de sensor utilizado para detecção de descargas	20
Figura 2.11: Fotografia retirada de cima das nuvens por avião da NASA	21
Figura 2.12: Modelo do circuito elétrico atmosférico global	22
Figura 2.13: Captor de Franklin instalado	23
Figura 2.14: Modelo de SPDA tipo gaiola de Faraday	24
Figura 3.1: Divisão de uma árvore	26
Figura 3.2: Corte transversal de um tronco de árvore	27
Figura 3.3: Região com alta densidade de árvores na região amazônica	29
Figura 3.4: Tipo de modelagem elétrica utilizando resistores	30
Figura 3.5: Medição de teor de umidade de árvore a partir de corrente contínua ...	32

Figura 3.6: Perda de casca e de madeira em um tronco	34
Figura 3.7: Perda de madeira em árvore atingida por um raio	35
Figura 3.8: Perda de casca de uma árvore em Brasília	36
Figura 3.9: Abeto de 32 metros destruído após ser atingido por descarga atmosférica, na Alemanha	37
Figura 3.10: Abeto de 30 metros destruído após ser atingido por descarga atmosférica, na Áustria	38
Figura 3.11: Modelagem do ambiente estudado feita no software CST STUDIO SUITE 2015	39
Figura 3.12: Modelo de humanoides em posições distintas dentro do alojamento simulado	40
Figura 3.13: Distribuição de corrente da descarga ao atingir uma árvore	41
Figura 4.1: Registro de uma árvore sendo atingida por um raio na Finlândia	43
Figura 4.2: Registro de uma árvore sendo atingida por um raio na Finlândia, com descarga lateral	45
Figura 4.3: Grupo de árvores mortas em meio a floresta devido a uma descarga atmosférica	46
Figura 5.1: Comparação de uma gaiola de Faraday com um conjunto de árvores.....	47
Figura 5.2: Exemplo de malha de aterramento	48
Figura 5.3: Ilustração da tensão de passo de acordo com a NBR 15751.....	49
Figura 5.4: Edifício que utiliza sua estrutura como conductor de descida do SPDA.....	50
Figura 5.5: Modelo de conjunto de árvores próximas com uma pessoa no meio.....	51

Figura 5.6: Modelagem elétrica baseada em resistores das árvores 2 e 3 da figura 4.7	52
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Constante dielétrica e Rigidez dielétrica de alguns materiais	7
Tabela 3.1: Resistência elétrica de uma árvore em função do teor de umidade	31

1.INTRODUÇÃO

O Brasil é o país com uma das maiores incidências de raios em todo o mundo. Estima-se que por ano, cerca de 50 milhões de descargas atingem o seu território [1], por ser o país de maior extensão da zona tropical de todo o planeta. Vale mencionar que a área entre as cidades de Coari e Manaus é a com maior concentração nacional de descargas atmosféricas, sendo a região amazônica, que é composta por uma densa vegetação, líder nesse quesito em geral.

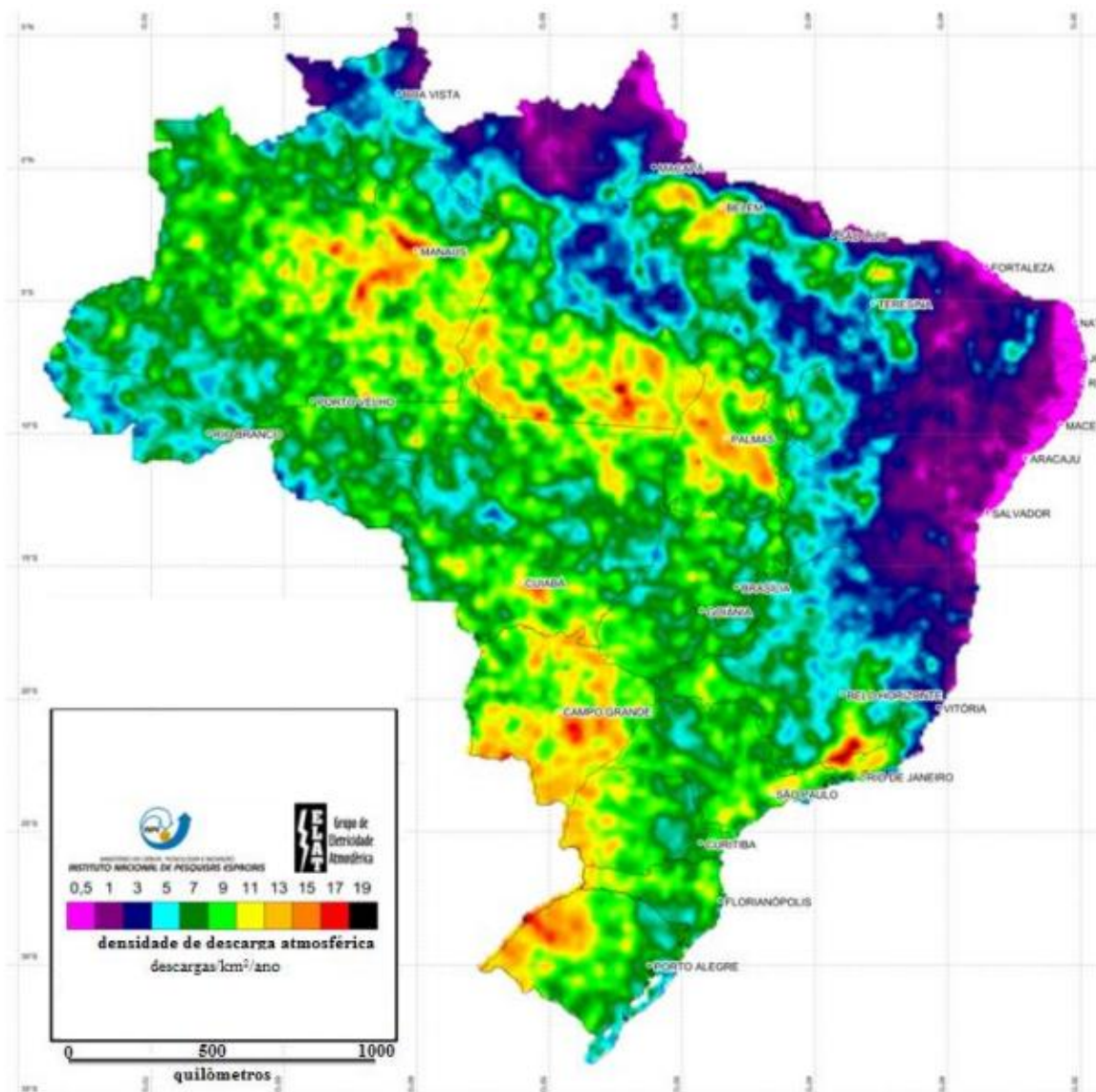


Figura 1.1 – Mapa de densidade de descargas atmosféricas no Brasil [1].

As descargas elétricas são responsáveis no Brasil por prejuízos da ordem de R\$ 1 bilhão anualmente, além de terem causado a morte de 1792 pessoas no período dos anos 2000 a 2014. Dessas mortes, 25% das vítimas estavam trabalhando em atividades rurais, enquanto 9% buscavam abrigo embaixo de árvores durante tempestades [1]. A Figura 1.1 apresenta um mapa de incidências de descargas atmosféricas no Brasil, disponibilizado pelo Grupo de Eletricidade atmosférica (ELAT), que é vinculado ao INPE.

1.1. Motivação

As árvores são alvos constantes de descargas atmosféricas, sendo bem conhecido o fato de que buscar abrigo em árvores durante uma tempestade não é uma boa ideia, pois a probabilidade de ser atingido por um raio é maior debaixo de árvores. Estar em regiões próximas a árvores durante tempestades também não é recomendado, sendo comuns as notícias e estudos sobre pessoas ou animais afetados devido à corrente que se dissipou no solo.

Apesar de existirem estudos que expliquem satisfatoriamente os fenômenos relacionados com as descargas atmosféricas em uma árvore e seus efeitos, pouco se conhece sobre as características dos raios atingindo um conjunto de árvores próximas que formam uma copa densa em sua região superior. Mesmo não existindo estatísticas oficiais para esse fenômeno, é possível imaginar que sua frequência de ocorrência seja alta, principalmente em países como o Brasil, que possui muita vegetação em seu território. A Figura 1.2 apresenta um mapa oficial do IBGE que mostra a cobertura vegetal do território brasileiro.

Segundo dados do próprio governo brasileiro [2], cerca de 60,7% de todo o território nacional é coberto por florestas, totalizando aproximadamente 516 milhões de hectares. Ao se comparar as Figuras 1.1 e 1.2 por sobreposição, observa-se que as áreas com maior incidência de raios coincidem com as que possuem regiões de florestas, caracterizadas em sua maioria por árvores altas e densas, principalmente na região amazônica.

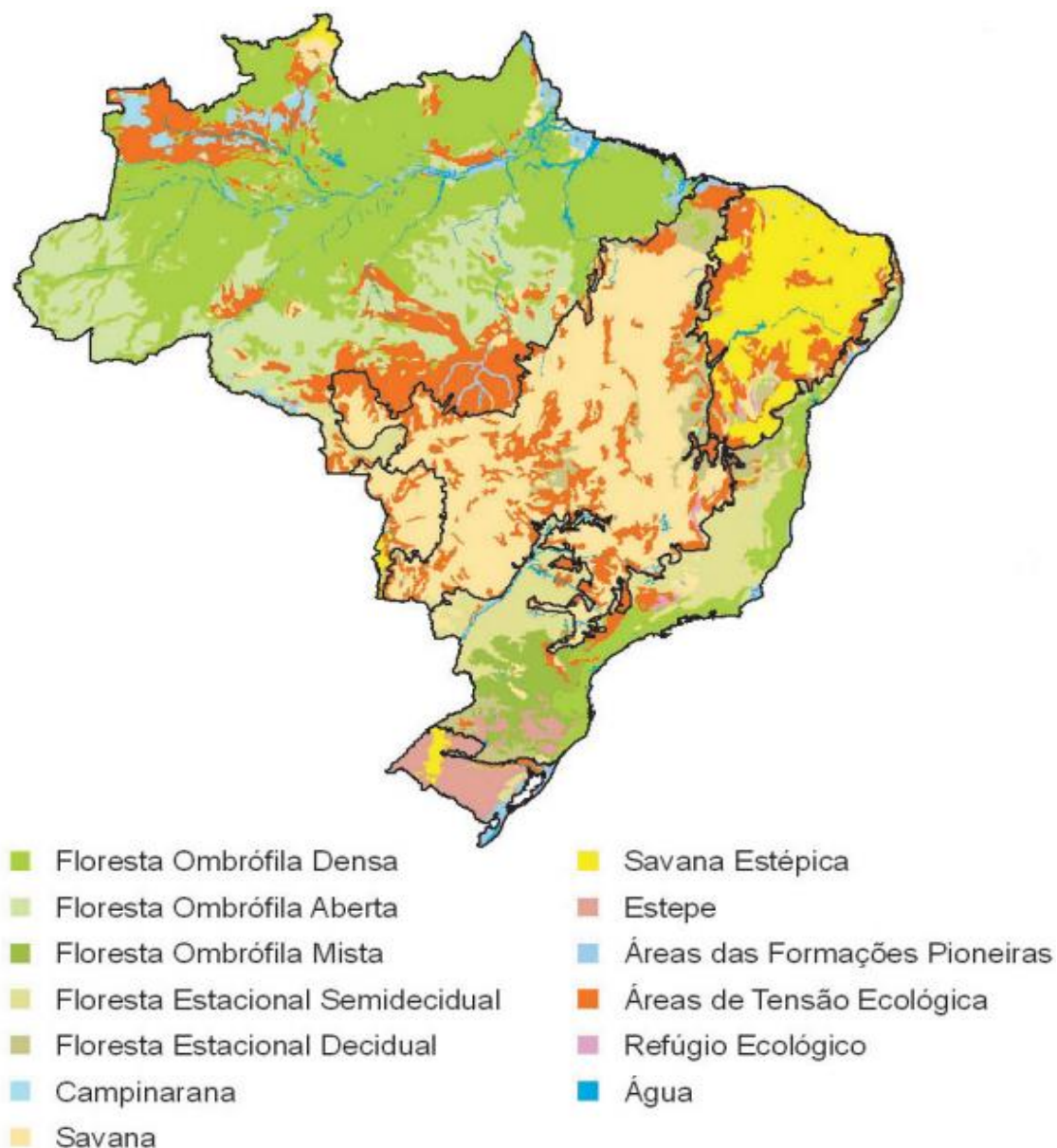


Figura 1.2 – Mapa da vegetação brasileira [3].

Para este trabalho, é interessante definir bem alguns conceitos que serão utilizados. A raiz de uma árvore é o órgão que se encontra sob a superfície do solo e é responsável pela captação de água e nutrientes para a planta. A copa nada mais é do que a região superior de uma árvore composta por suas folhas e galhos. Por conjunto de árvores, entende-se pelo menos 2 árvores próximas, entretanto, será verificado que para o estudo desenvolvido, considerar 4 árvores como vértices de um quadrado fará mais sentido. Por árvores próximas, compreende-se um conjunto de árvore no qual não seja visualmente possível distinguir as copas das diferentes árvores em sua região mais alta. Para tal definição, deve-se imaginar árvores como

mangueira ou jaqueira, e não pinheiros, já que esses afunilam suas copas conforme a altura aumenta.

Dessa forma, busca-se com esse trabalho reunir as informações disponíveis acerca de descargas atmosféricas atingindo um conjunto de árvores próximas e propor um modelo que possa explicá-lo de forma qualitativa a partir de uma comparação com a gaiola de Faraday. Tal comparação, como será apresentado, deve-se ao fato das árvores serem meios mais condutores que o ar.

1.2. Estruturação do trabalho

Esta monografia está organizada em 6 capítulos. No capítulo 1 é feita uma introdução acerca do tema, expondo as motivações que levaram ao seu estudo. O capítulo 2 é dedicado a desenvolver os principais conceitos associados com as descargas elétricas e sua formação.

O capítulo 3 é dedicado a explicar as relações existentes entre os raios e as árvores. O capítulo 4 faz uma revisão bibliográfica sobre a ocorrência das descargas atmosféricas em regiões de árvores que formam densas copas em sua parte superior. O capítulo 5 propõe um modelo qualitativo para explicar o fenômeno na gaiola de Faraday.

Por fim, o capítulo 6 traz uma conclusão de todo o estudo desenvolvido além de indicar sugestões para trabalhos futuros.

2.FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

De acordo com a NBR 5419, que normatiza os sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA), a descarga atmosférica é uma descarga elétrica de origem atmosférica entre uma nuvem e a terra ou entre nuvens, consistindo em um ou mais impulsos de vários quilo ampères (kA).

2.1. Estrutura elétrica da atmosfera

Para uma melhor compreensão do fenômeno das descargas atmosféricas, é essencial entender a estrutura elétrica da atmosfera.

A atmosfera é uma camada formada por diversos gases, sendo o gás nitrogênio e o gás oxigênio os com maior participação em sua composição.

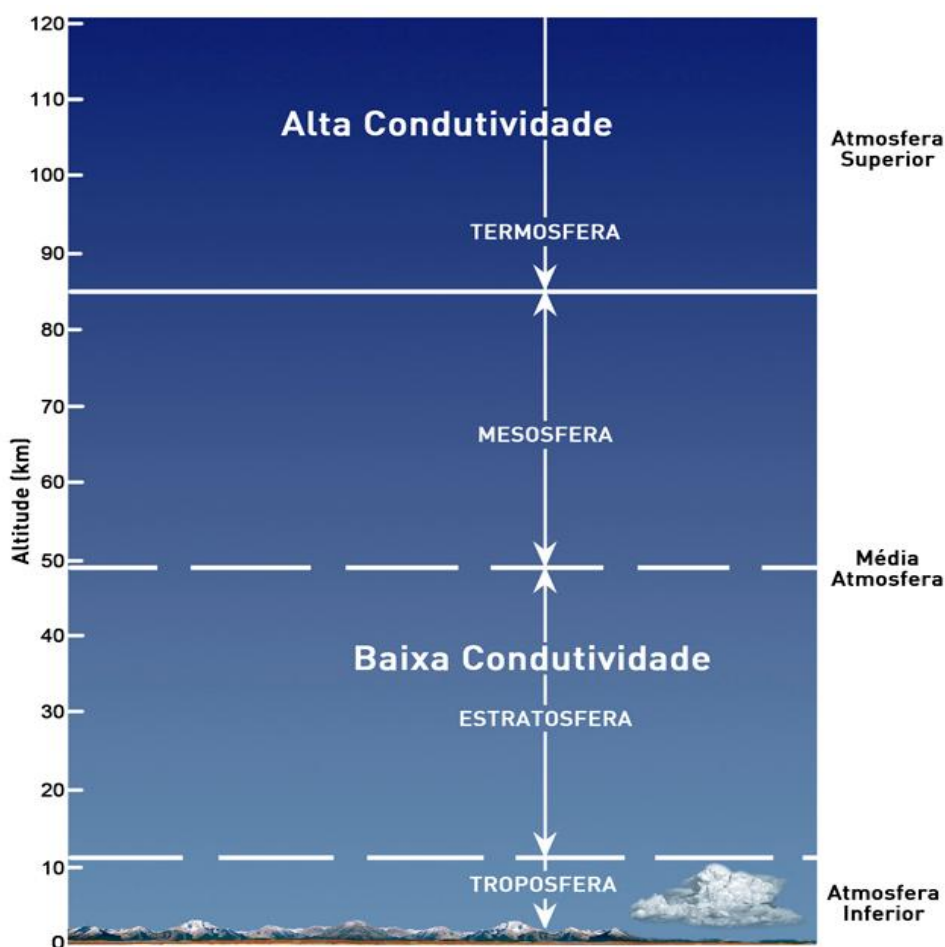


Figura 2.1 – Divisão elétrica da atmosfera [4].

A formação das descargas atmosféricas só é possível graças à presença de íons no ar, e a disponibilidade deles varia de acordo com diversos parâmetros. Por serem partículas eletricamente carregadas, quanto maior a sua concentração em uma região, maior será a condutividade do meio. Dessa forma, é possível dividir a atmosfera em regiões, de acordo com seu nível de condutividade, como ilustra a Figura 2.1.

A atmosfera inferior, composta pela troposfera, é uma região de baixa condutividade, assim como a média atmosfera, formada pela estratosfera e mesosfera [4]. As regiões da atmosfera superior possuem maior concentração de íons, logo, uma maior condutividade.

É importante entender os mecanismos responsáveis pela formação dos íons. Um dos fenômenos que mais contribui para sua formação é a interação entre os raios cósmicos e as partículas neutras da atmosfera [4]. Esses raios possuem energia suficiente para ionizar uma parcela das moléculas dos gases presentes na atmosfera. Dessa forma, elétrons livres e íons positivos se formam, sendo que os elétrons livres rapidamente se ligam com partículas neutras, formando íons negativos.

Outro fenômeno responsável pela ionização da atmosfera é a partir de partículas advindas do decaimento radioativo de substâncias presentes no solo e no ar, como o urânio e o gás radônio. A contribuição desse evento, porém, só é significativa sobre o solo para alturas de até 1 km, sendo que para altitudes superiores, os raios cósmicos são os maiores responsáveis pelo processo de ionização.

Um conceito importante para caracterizar eletricamente a atmosfera é o de condutividade, que representa a capacidade da atmosfera de conduzir uma corrente elétrica, ou seja, a capacidade de cargas elétricas se movimentarem no meio. Para as camadas inferior e média da atmosfera, a condutividade é isotrópica e é diretamente proporcional ao produto da mobilidade, da densidade dos íons e de suas cargas. Nessas camadas, a condutividade aumenta com a altitude e varia de acordo com a latitude. Já para a camada superior da atmosfera, a condutividade costuma ser maior e dependente da direção dos elétrons e cargas livres, pois suas

posições influenciam na mobilidade, que é influenciada pelo campo magnético da Terra.

2.2. Constante dielétrica e Ruptura dielétrica

O caminho escolhido pelas descargas atmosféricas, não importa seu tipo, sempre é o ar. Diferentemente dos meios condutores que apresentam cargas elétricas livres para se movimentar em abundância, o ar é considerado um dielétrico.

Cada material é caracterizado por uma constante dielétrica ϵ_r , também conhecida por permissividade relativa. Matematicamente, essa constante é definida por

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}, \quad (2.1)$$

onde ϵ é a permissividade do dielétrico e ϵ_0 é a permissividade do espaço livre, dada por $\frac{10^{-9}}{36\pi} [F/m]$.

A fim de comparação, apresentam-se na tabela 2.1 os valores da constante dielétrica e rigidez dielétrica de alguns materiais.

Tabela 2.1 – Constante dielétrica e Rigidez dielétrica de alguns materiais [5].

Material	Constante Dielétrica ϵ_r	Rigidez Dielétrica E (V/m)
Ar (1 atm.)	1	3×10^6
Petróleo	2,1	12×10^6
Borracha (dura)	3,1	25×10^6
Madeira	2,5 – 8,0	5×10^6
Papel	7	12×10^6
Vidro	5 – 10	35×10^6
Titanato de Bário	1200	$7,5 \times 10^6$

Por mais que um dielétrico seja caracterizado pela baixa presença de partículas carregadas livres, ao ser submetido a um campo elétrico, observa-se um fenômeno conhecido como polarização do dielétrico. Para compreender esse

fenômeno, ilustra-se uma partícula do dielétrico como uma esfera com um núcleo carregado positivamente envolto por uma nuvem eletrônica carregada negativamente, como mostrado na Figura 2.2.

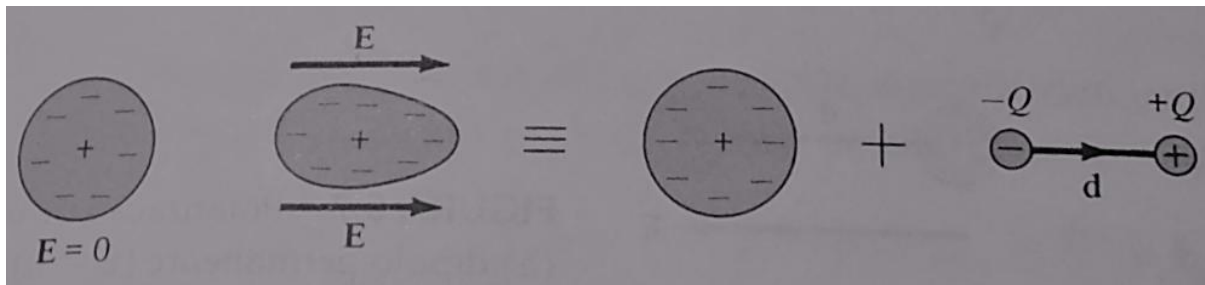


Figura 2.2 - Formação de um dipolo elétrico a partir de uma partícula neutra [5].

Ao se aplicar um campo elétrico nesse modelo apresentado de dielétrico, os dois conjuntos de cargas sofrerão forças elétricas em sentidos opostos, fazendo com que a partícula se torne polarizada, como ilustrado na Figura 2.2.

Moléculas de hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e outros gases se comportam da maneira apresentada. Dessa forma, o ar entre o solo e a nuvem se polariza quando estes estão carregados e conseqüentemente produzindo um campo elétrico. Quando esse campo no qual o ar está sob efeito é forte o suficiente para arrancar elétrons das moléculas já polarizadas, diz-se que houve uma ruptura dielétrica.

O fenômeno da ruptura dielétrica ocorre quando o meio deixa de ser caracterizado como um dielétrico e passa a ser visto como um condutor, devido ao alto nível de partículas carregadas livres. Um valor importante que caracteriza um material é a sua rigidez dielétrica, que indica o máximo campo elétrico por unidade de comprimento que um dielétrico pode ser submetido sem que haja sua ruptura.

2.3. Formação das nuvens e de seus campos elétricos

Apesar de ser possível a ocorrência de descargas atmosféricas associadas à alguns eventos como erupções vulcânicas, explosões nucleares e tempestades de areia, é mais comum observá-las na presença de nuvens [6].

As nuvens são definidas como manifestações visíveis da condensação e deposição de vapor d'água na atmosfera [7]. Elas são constituídas por gotículas de

água ou cristais de gelo, além de partículas de fumaças industriais, poeira e alguns outros gases. Sua formação depende de dois fenômenos [8].

O primeiro consiste na existência de um ar saturado, que implica que o ar está com muito vapor d'água. O segundo evento se baseia na presença de uma superfície na qual esse ar saturado possa se condensar. No caso de uma superfície próxima ao solo obtém-se o orvalho, mas em altitudes maiores, é necessário que existam partículas em suspensão, conhecidas por núcleos de condensação, para que essa condensação possa ocorrer. Quanto maior for o tamanho dessas partículas, menor deve ser o índice de saturação do ar para que o núcleo de condensação se forme, ou seja, o processo de formação de nuvens está diretamente ligado com o nível de pureza do ar. Logo, quando muitos desses núcleos se formam e se juntam, ocorre a formação de uma nuvem. Quando formada, ela pode continuar a crescer de tamanho, devido ao processo já descrito, ou se dissipar, caso as gotículas de água presentes evaporem na atmosfera.

As nuvens podem ser classificadas em quatro grupos, de acordo com [10]. Essa classificação se baseia na dimensão e altura da base da nuvem. A classe de nuvens altas abrange as do tipo *Cirrus*, *Cirrocumulus* e *Cirrostratus*. As nuvens médias são as *Altostratus* e *Alto cumulus*. As baixas se dividem em *Stratus*, *Stratocumulus* e *Nimbostratus*. Por fim, as com desenvolvimento vertical são as *Cumulus* e *Cumulonimbus*, sendo essa última a de maior importância para o escopo do trabalho. Na Figura 2.3 estão ilustrados os diversos tipos de nuvens e seus respectivos nomes.

Como é possível observar pela Figura 2.3, algumas nuvens possuem maior extensão horizontal, enquanto outras são caracterizadas por um maior desenvolvimento vertical. A nuvem com maior verticalidade apresentada, a *Cumulonimbus*, é conhecida nuvem de tempestade e está diretamente ligada ao aparecimento das descargas elétricas atmosféricas.

As nuvens do tipo *Cumulonimbus* podem possuir diferenças de altura entre sua base e o topo da ordem de 15 km, possuindo geralmente um formato de bigorna. Essa característica é ideal para que apareçam fortes campos elétricos em seu interior devido ao acúmulo de cargas nas suas extremidades.

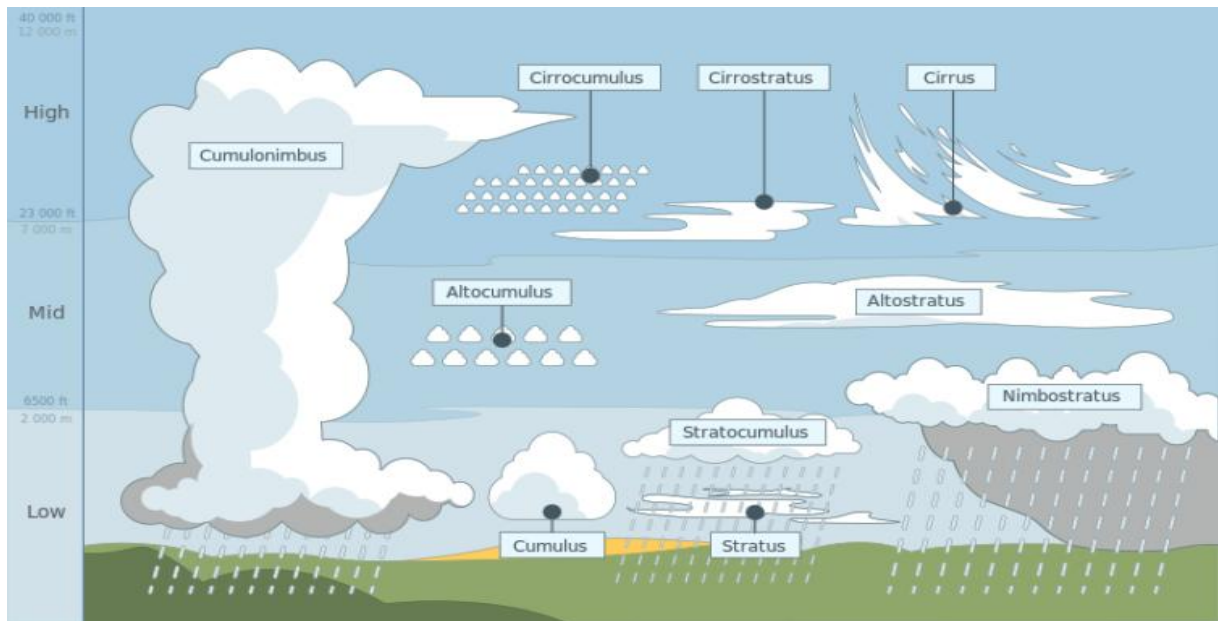


Figura 2.3 - Tipos de nuvens [11].

Várias são as explicações para a ocorrência da eletrificação desse tipo de nuvem. Devido às diferenças de temperatura e pressão presentes em seu interior, são formadas correntes de convecção de ar ascendente que carregam partículas mais leves para cima, enquanto a ação da gravidade é responsável por trazer outras para a base da nuvem. Durante essa movimentação de partículas, ocorre o atrito entre elas, justificando em parte a eletrificação das mesmas e o acúmulo de cargas.

Outra explicação possível para o fenômeno foi apresentada pelo físico Charles T. R. Wilson [12]. Ele propôs que quando uma gotícula de água se precipita do topo da *Cumulonimbus*, ela fica sob o efeito de um campo elétrico da ordem de 100 V/m, fazendo com que as cargas que constituem essa partícula se polarizem, com as positivas ficando na parte inferior da gotícula. Durante a queda, os íons negativos existentes no ar são então atraídos e se juntam durante o movimento de queda. Esse acúmulo de cargas negativas faz com que a base da nuvem se torne um polo negativo, enquanto sua parte superior terá a predominância de cargas positivas, formando assim um forte campo elétrico em seu interior. A Figura 2.4 apresenta um esquemático desse tipo de nuvem de tempestade mostrando alguns dos eventos que ocorrem em seu interior.

Quando a nuvem ficar carregada sobre o solo, ele perceberá o acúmulo de

cargas de sentido oposto, no caso positivas, por indução. Dessa forma, um intenso campo elétrico que pode chegar a ordem de centenas de quilo-volts por metro é produzido entre a nuvem e o solo, sendo esse o responsável pelo rompimento do dielétrico da atmosfera, fenômeno indispensável na formação das descargas elétricas atmosféricas. Vale mencionar que não é possível fornecer um valor exato para a altura mínima da base da nuvem em relação ao solo para que ocorra a descarga, já que deve-se levar em conta o valor do campo elétrico existente e a condutividade da camada de ar, que influenciará no valor de sua constante dielétrica.



Figura 2.4 – Esquemático do interior de uma nuvem *Cumulonimbus* [13].

2.3.1. Nuvens de tempestade

As nuvens de tempestade são caracterizadas visualmente por sua cor escura em tons de cinza. Como dito, as nuvens de tempestade que originam as descargas atmosféricas são do tipo *Cumulonimbus*, caracterizadas por sua grande extensão vertical. Em nuvens menores a cor branca prevalece, pois, a luz solar ao atingir as gotículas de água que as formam se dispersa em todas as cores, resultando na tonalidade branca. Já em nuvens de tempestade, responsáveis pelos raios, a luz

solar não é capaz de penetrar em toda a sua extensão. Além disso, quando a nuvem está muito saturada, prestes a chover, as partículas de água e gelo em seu interior são maiores. Esses dois fatos são responsáveis por dar os tons mais escuros para as nuvens de tempestade [14].

2.3.2. Contribuição das árvores na formação das nuvens

Um fato de interesse para o estudo apresentado nesse trabalho é que as árvores favorecem a formação das nuvens. As árvores liberam vapor d'água no ar a partir do processo da transpiração, aumentando a umidade do ar. Além disso, elas emitem compostos orgânicos voláteis (COV) de vários tipos, como hidrocarbonetos oxigenados, aldeídos e cetonas, além de sais de potássio. Essas substâncias funcionam como núcleos de condensação de nuvens (NCN), que formam as partículas citadas como formadoras das nuvens [9].

2.4. Formação do canal de descarga

Com os conceitos referentes a dielétrico e seus efeitos consolidados, resta entender de qual maneira se forma o caminho pelo qual de fato passará a descarga atmosférica. Para tal caminho será atribuído o nome de canal de descarga. A formação do canal de descarga pode ser compreendida como um efeito de avalanche de *Townsend*, mais popularmente conhecido como avalanche de elétrons [15].

Devido aos efeitos já citados, principalmente pela radiação cósmica, em média existem 10 elétrons livres por centímetro cúbico na atmosfera [15]. Essas partículas não permanecem nesse estado por um longo período, pois são rapidamente ligadas a moléculas de oxigênio presentes na atmosfera. Entretanto, quando esses elétrons estão sendo submetidos a um campo elétrico intenso eles sofrem uma força elétrica que os aceleram, adquirindo energia. Durante esse movimento, algumas dessas cargas livres acabam por se ligar a outras moléculas, mas caso experimentem um campo elétrico muito intenso, elas podem obter energia suficiente para, ao colidir com outras moléculas, liberar novos elétrons. Essas cargas liberadas passarão a fazer parte do processo, colidindo com outras moléculas e arrancando novos elétrons. Assim se dá início ao fenômeno da avalanche de

elétrons, que segue ilustrado na Figura 2.5.

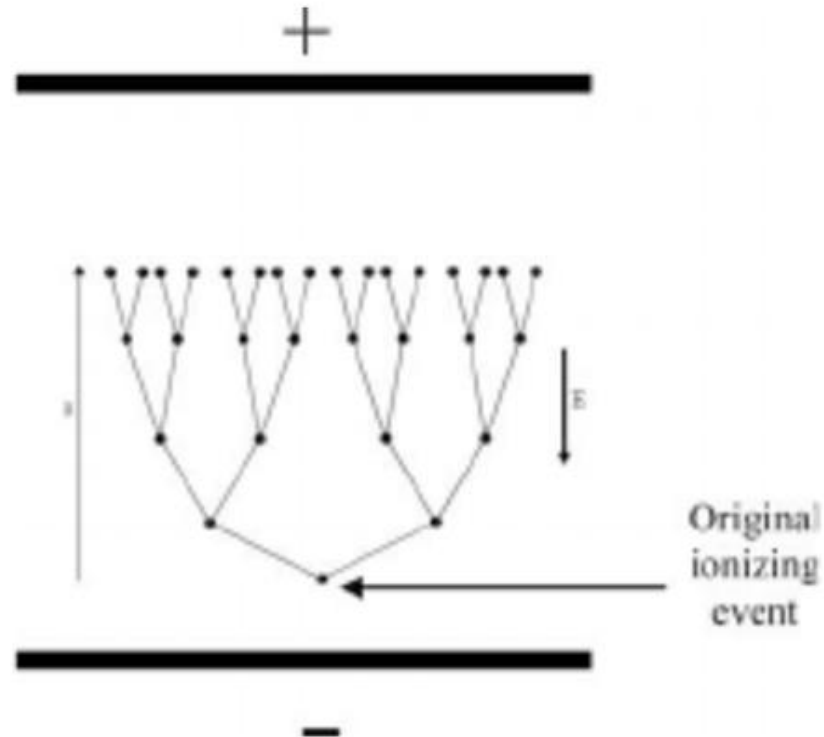


Figura 2.5 - Esquemático de uma avalanche de elétrons [15].

É possível descrever matematicamente esse processo. Para que um elétron tenha energia suficiente para colidir com outras moléculas e causar a ionização, ele deve percorrer uma distância dada aqui por λ . Ao percorrer essa distância, esse elétron é responsável pela liberação de λ^{-1} novas partículas semelhantes, sendo esse número aqui representado por α [21]. Dessa forma, é possível definir que o número de elétrons liberados nessa reação em cadeia após o primeiro ter percorrido uma distância x é dado por

$$n = e^{\alpha x}. \quad (2.2)$$

Na expressão (2.2), entretanto, não foi considerado que algumas das cargas negativas livres são ligadas a outras moléculas no processo. Elas serão representadas por η , e ao serem consideradas em (2.2), resulta-se na equação

$$n = e^{(\alpha - \eta)x}, \quad (2.3)$$

para o número de elétrons livres após o primeiro ter percorrido a distância x .

Por (2.3), percebe-se que para a reação em cadeia ocorrer, deve-se ter que $\alpha > \eta$. Experimentalmente, constatou-se que ambos os parâmetros dependem da razão do campo elétrico, E , pela densidade do ar, δ . O parâmetro α aumenta com o aumento da relação E/δ , enquanto o parâmetro η diminui. Percebe-se então que a presença de campos elétricos intensos é condição suficiente para que a relação $\alpha > \eta$ seja satisfeita, fazendo com que o número de elétrons dado por (2.3) seja uma função crescente. Dessa forma, o fenômeno da avalanche de elétrons toma forma e é responsável por constituir o canal de descarga.

Conforme o campo elétrico existente entre a nuvem e o solo for aumentando, ocorre então a ruptura dielétrica do ar simultaneamente com a formação do canal de descarga, que transportará as cargas entre os dois meios de forma muito rápida, resultando enfim na descarga atmosférica. O efeito visual emitido pela descarga é conhecido como relâmpago, enquanto o som produzido pelo grande deslocamento do ar é chamado de trovão.

Devido ao fato do processo iniciado pela avalanche de elétrons não ter um comportamento uniforme e linear, o canal de descarga formado apresentará formatos variados, de acordo com o caminho que o processo de colisões de partículas tomar. Por isso, ao se observar uma descarga atmosférica é possível enxergar diversos caminhos se ramificando de um tronco principal, como ilustra a Figura 2.6.

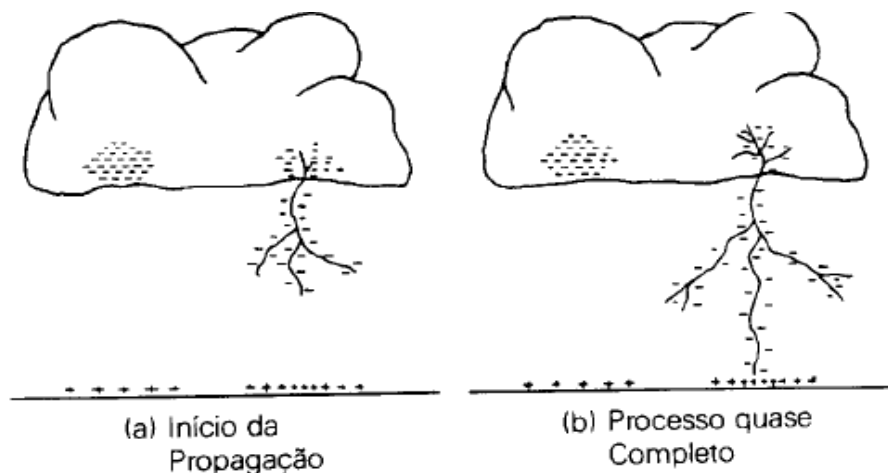


Figura 2.6 - Formação do canal de descarga [16].

2.5. Características das descargas atmosféricas

A partir dos conceitos teóricos expostos, fica simples entender como ocorrem as descargas elétricas atmosféricas. Quando houver um forte campo elétrico entre uma nuvem e o solo, é possível que o ar nesse meio perceba a ruptura de sua rigidez dielétrica, tornando-se propício para o surgimento da descarga. Vale destacar que esse campo elétrico deve ser muito intenso, já que a rigidez dielétrica do ar é da ordem de 3 MV/m [17].

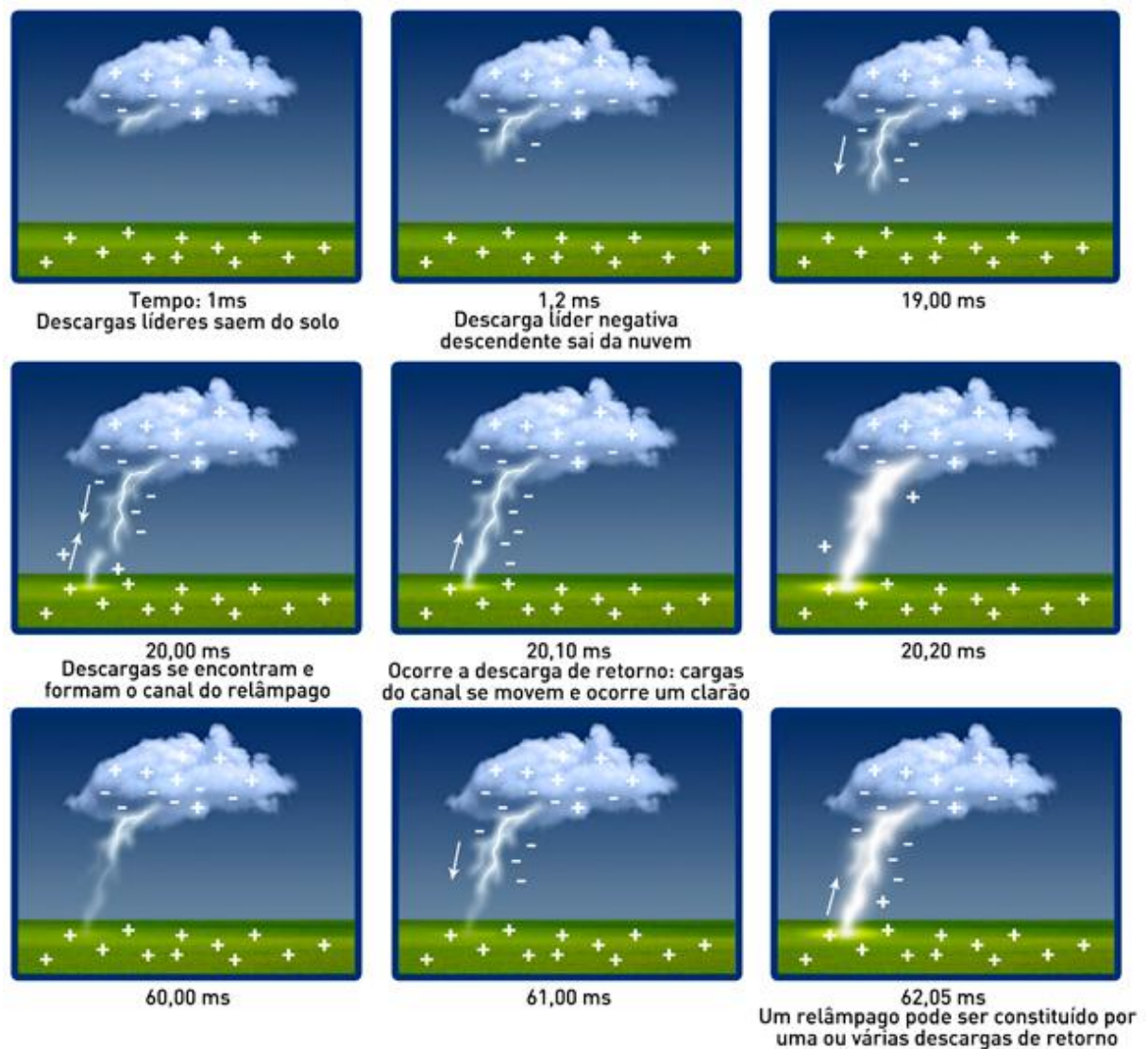


Figura 2.7 - Etapas de formação da descarga atmosférica [18].

O canal da descarga começa a aparecer inicialmente na base da nuvem, se deslocando em direção ao solo. Chega um momento, porém, que outro canal surge

saindo do solo devido à intensificação do campo elétrico, encontrando-se com o primeiro. Nesse instante, as cargas negativas das nuvens se deslocam rapidamente pela extensão do canal, resultando em uma forte corrente e nos efeitos já conhecidos. A esse deslocamento de cargas é dado o nome de corrente de retorno. Pode-se considerar que nessa corrente há um deslocamento de cargas positivas na direção solo-nuvem, ou de cargas negativas na direção nuvem-solo. A Figura 2.7 apresenta em etapas a formação completa da descarga, incluindo uma escala temporal média para cada passo. Outro aspecto interessante é que comumente ocorrem diversas descargas no mesmo canal formado, em um intervalo de tempo da ordem de milissegundos, sendo esse fenômeno imperceptível para um observador comum.

É possível classificar as descargas atmosféricas de acordo com o tipo de sua ocorrência. Apesar de algumas bibliografias [19, 20] apresentarem diversas classes, aqui as descargas serão agrupadas em apenas 3, conforme descrito em [16]. Esses grupos estão ilustrados na Figura 2.8 e estão descritos abaixo:

- Descargas nuvem-solo: apesar não ser o de maior ocorrência considerando toda a atmosfera, é o de maior interesse de estudos, já que seus impactos são mais facilmente observados e sentidos. Estima-se que 99% das descargas que chegam ao solo são desse tipo, enquanto os outros 1% são do tipo solo-nuvem [17]. Pode-se ainda classificar esse tipo de descarga em 4 subgrupos, de acordo com o movimento das cargas pelo canal: negativa descendente, negativa ascendente, positiva descendente e positiva ascendente, sendo o primeiro o mais comum;
- Descargas entre nuvens (nuvem-nuvem): como o próprio nome sugere, ocorrem em um canal formado entre duas nuvens distintas;
- Descargas intranuvem: é o tipo mais recorrente, sendo responsável por 70% de todas as descargas na atmosfera [17]. Ele ocorre dentro de nuvens de tempestade devido aos campos elétricos existentes em seu interior.

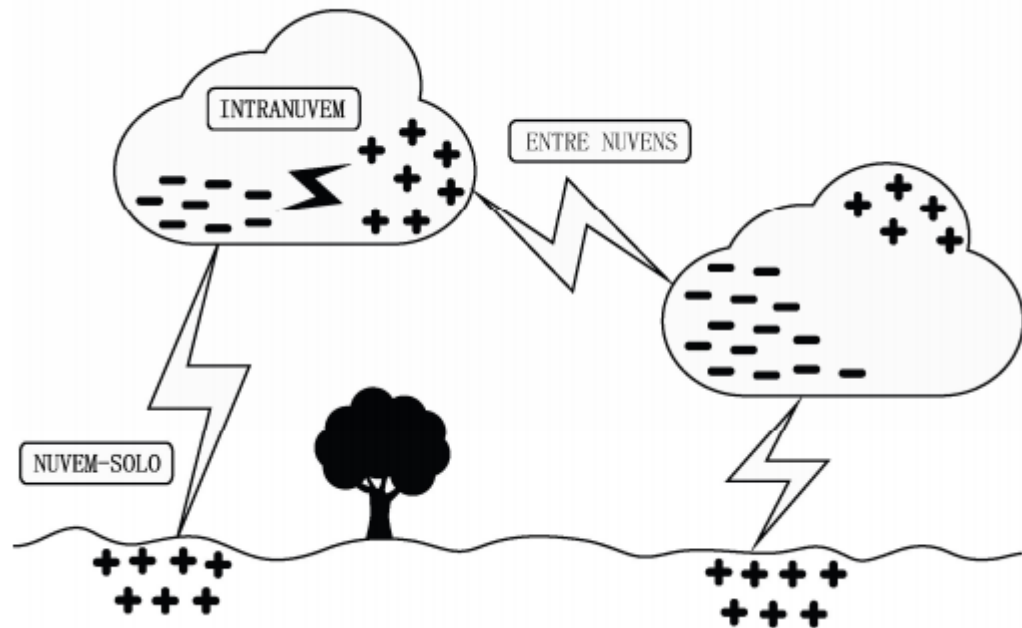


Figura 2.8 - Tipos de descargas atmosféricas [21].

Para fins de estudo, é necessário definir alguns parâmetros de interesse, principalmente para o desenvolvimento de sistemas de proteção. Esses parâmetros, com suas respectivas representações simbólicas [22], são:

- Corrente de pico, i_{Max} : o nome já é autoexplicativo. É um parâmetro de interesse, pois determina a diferença de tensão gerada no solo quando a descarga o alcança;
- Carga, Q : pelo Sistema Internacional, é medida em *Coulombs* (C). Está diretamente ligada ao valor do campo elétrico entre nuvem-solo, sendo obtida pela integral da corrente em função do tempo;
- Energia específica, W/R : é dada pela integral temporal do quadrado da corrente da descarga. É de interesse, pois aponta possíveis efeitos térmicos que ocorrem em um condutor metálico atingido pela descarga;
- Máxima derivada de corrente, $(di/dt)_{Max}$: de acordo com os conhecimentos da teoria magnética, percebe-se que esse parâmetro indica variações no campo magnético, que pode induzir tensões em circuitos eletrônicos.

Existe uma grande variação nos valores desses parâmetros de acordo com a

descarga observada. Em relação a corrente de pico, a média está por volta de 30 kA, podendo chegar até 400 kA [23]. A carga média transferida da nuvem para o solo costuma variar em torno de 25 C, mas pode superar 100 C. A velocidade da formação do canal fica por volta dos 40 mil km/h. Todos esses valores dependem de diversas condições, como latitude do local, altitude, umidade do ar, tipo de terreno, e temperatura. A Figura 2.9 ilustra um exemplo de gráfico da corrente pelo tempo de uma descarga descendente negativa [22]:

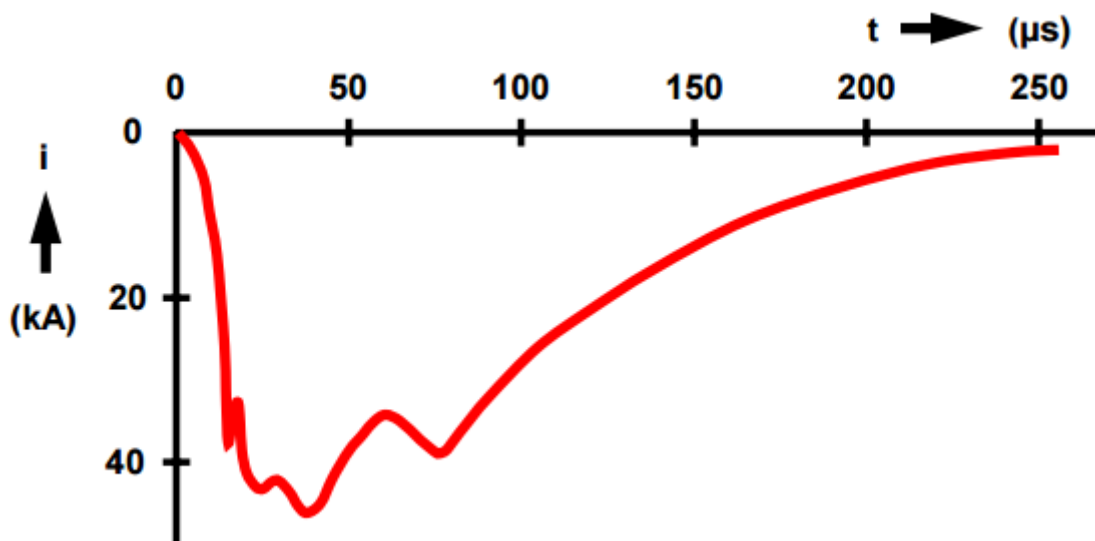


Figura 2.9 - Corrente pelo tempo de uma descarga descendente negativa [22].

Por fim, é interessante analisar as maneiras que uma descarga pode atingir direta ou indiretamente uma pessoa. Existem 5 possibilidades [24]:

- Descarga direta: quando a pessoa é atingida diretamente pela descarga, tornando-se uma parte do canal. Esse tipo de evento é bem incomum, sendo mais registrado em campos abertos durante tempestades. Normalmente é fatal, devido à alta corrente que passa pelos sistemas nervoso e cardiovascular;
- Descarga lateral: nesse tipo, a descarga atinge um objeto mais alto, como uma árvore ou uma torre e o indivíduo atua como um caminho de curto-circuito para a corrente. Muito comum em pessoas que procuram abrigo debaixo de árvores durante tempestades;
- Corrente de terra: é o evento responsável pela maioria das mortes causadas

por descargas. Ao atingir um objeto mais alto, como uma árvore, a energia da descarga percorre o solo até ser totalmente dissipada. Caso uma pessoa ou um animal estejam a uma distância próxima do ponto da descarga, seus pontos de apoio no chão são responsáveis por fornecerem uma diferença de potencial em seu corpo que faz com que a corrente circule;

- **Condução:** caso a descarga atinja um objeto condutor metálico, como uma cerca ou um piso de metal, a corrente será conduzida por distâncias maiores, podendo atingir pessoas que estejam em contato com tal objeto;
- *Streamer:* apesar de pouco comum, esse tipo de descarga ocorre quando o canal está se formando já próximo ao solo, e é produzido um caminho alternativo, semelhantemente a uma descarga lateral, mas sem atingir nenhum objeto.

2.6. Métodos de detecção das descargas atmosféricas

Tão importante quanto entender a formação das descargas atmosféricas, compreender os métodos de detecção disponíveis para seu estudo e observação é indispensável. Apesar da dificuldade de previsão de quando o fenômeno irá acontecer e de sua localização, ao longo dos anos tornou-se possível desenvolver algumas técnicas e equipamentos capazes de realizar tal tarefa.

O primeiro passo dado na direção de obter dados referentes às descargas foi com a utilização da espectroscopia, por volta de 1870 [25]. Ela consiste em decompor a luz emitida pelo relâmpago em suas frequências, buscando obter informações de seu espectro. Essa técnica, porém, só foi fornecer dados importantes, como a temperatura da descarga e densidade de elétrons em seu canal, a partir da década de 1960 [25].

Com o passar dos anos, a detecção das descargas foi se aprimorando bastante, mas até hoje os principais métodos ainda se baseiam na radiação eletromagnética emitida. Os sensores atuais se caracterizam pela faixa de frequência em que atuam. Sistemas de frequências muito baixas (VLF), que trabalham até algumas dezenas de quilo-hertz, são utilizados basicamente para detectar a ocorrência da descarga de acordo com a detecção simultânea de uma onda em diferentes sensores [25]. Apesar de sua simplicidade, é necessário apenas

um pequeno número desses equipamentos para cobrir áreas muito grandes. A Figura 2.10 ilustra um modelo desse sensor, que muito se assemelha com os que funcionam em outras faixas de frequências.



Figura 2.10 – Modelo de sensor utilizado para detecção de descargas [25].

Conforme se aumenta a faixa de operação do sensor, chegando à região de frequências muito altas (VHF), é possível utilizar mais sensores e analisar a direção de chegada da radiação magnética em cada um, assim como as diferenças de fase obtidas em cada equipamento [26]. A partir de um processamento desses dados, obtêm-se diversas características quantitativas da descarga, assim como um modelo tridimensional do canal.

Outra maneira de se observar os relâmpagos, é com o uso de torres de observação. Sensores de indução de campo magnético são colocados na base dessas torres, e elas por sua vez são instaladas normalmente em topos de montanha ou áreas com grande ocorrência de raios. Apesar de essa técnica ser bastante utilizada, inclusive no Brasil, existem estudos que apontam o uso das torres altera a densidade de descargas na região, além de aumentar o número de relâmpagos do tipo solo-nuvem [25].

Apesar do desenvolvimento dessas técnicas, o uso da fotografia ainda é de grande valia para a compreensão e estudo do fenômeno. Com o uso de câmeras que captam até 30 mil quadros por segundo, é possível observar o formação do canal de descarga e até o momento da descarga de retorno. Aeronaves de

observação de tempestades dispõem de câmeras para tirar fotografias das descargas atmosféricas de uma altura superior a das nuvens. Além disso, os próprios satélites podem ser utilizados para se obter imagens no momento exato do relâmpago. A Figura 2.11 mostra uma fotografia tirada do avião de observação DC-8, da NASA, a uma altitude de 12 km, em 1993 [26].

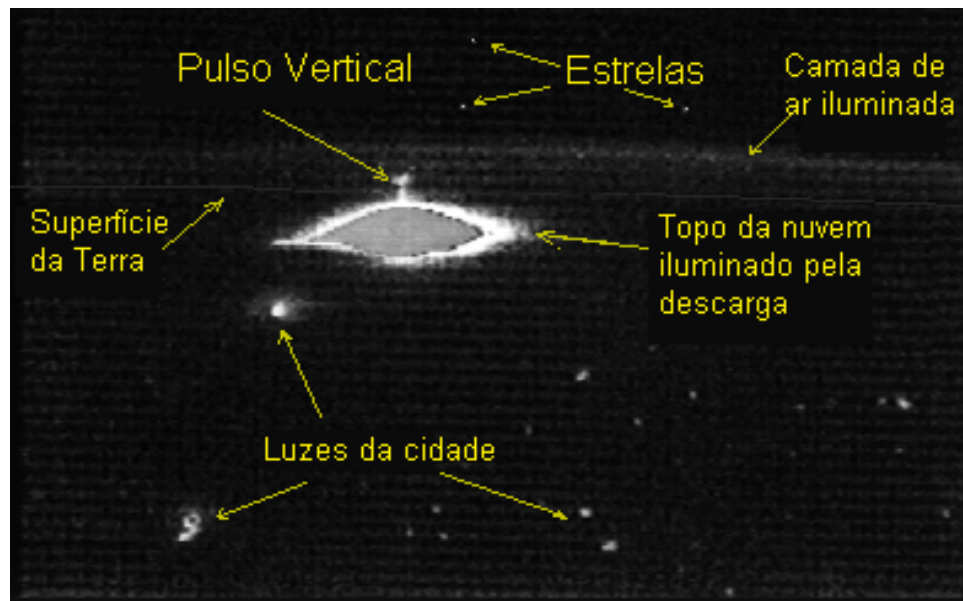


Figura 2.11 – Fotografia retirada de cima das nuvens por avião da NASA [26].

2.7. Circuito elétrico atmosférico global

Estima-se que nas áreas continentais da Terra, exista uma densidade superficial de cargas no valor de $-1,2 \times 10^{-9} \text{ C/m}^2$ [27]. Ao se integrar esse valor pela superfície total terrestre, obtém-se um total de 600 kC de carga. Devido à essa carga e à condutividade atmosférica existe um campo elétrico voltado para baixo, ou seja, no sentido atmosfera-solo. A atmosfera possui um valor de carga aproximadamente igual ao da superfície terrestre, com a diferença de serem cargas positivas.

Como a presença do campo elétrico vertical descrito é constante, foi proposto por Maxwell [27] que constantemente existe uma densidade de corrente voltada para baixo. Porém, seguindo esse pensamento, infere-se que em algum momento toda a carga da atmosfera fluiria para a superfície terrestre, cancelando sua carga e consequentemente o campo. Para explicar o motivo desse fenômeno não ocorrer, C.

T. R. Wilson propôs a teoria do capacitor esférico, que posteriormente seria conhecida como circuito elétrico atmosférico global.

De acordo com sua teoria, a superfície da Terra e a superfície atmosférica são modeladas como as placas de um capacitor. Entre essas placas haveria uma corrente de fuga entre as duas, estimada em 1000 A. Para que o capacitor se mantenha carregado, Wilson propôs que as tempestades com as descargas atmosféricas são responsáveis pelo transporte de cargas entre as placas. Como ocorrem simultaneamente cerca de 1000 tempestades ao redor do globo, cada uma contribuiria com 1 A para o circuito [27].

Apesar de não serem contemplados os diversos aspectos que contribuem para as variações do valor desse campo elétrico diariamente, a teoria postulada por Wilson fornece uma boa explicação para a permanente presença de tal campo elétrico na Terra. A Figura 2.12 apresenta em um esquemático o modelo do circuito elétrico atmosférico global.

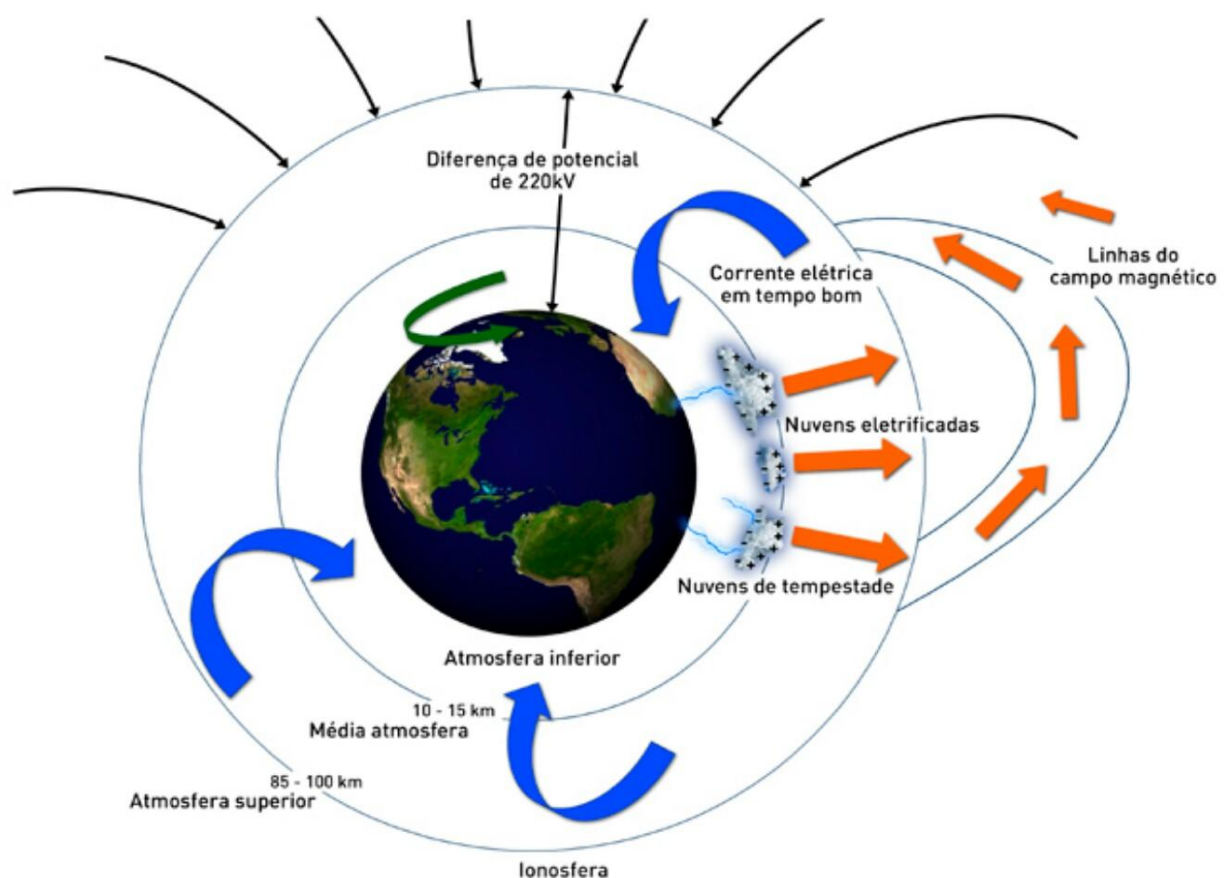


Figura 2.12 – Modelo do circuito elétrico atmosférico global [27].

2.8. NBR 5419 e os SPDA's

Na NBR 5419, intitulada "Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas", são estabelecidos os principais conceitos e métodos utilizados para se evitar que as descargas atmosféricas causem danos em pessoas e em bens materiais. O principal termo abordado nessa norma é o de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA). Os dois tipos principais de SPDA são: captor de Franklin e gaiola de Faraday [28].

Um captor de Franklin, mais comumente chamado de para-raios, é um objeto metálico semelhante a uma haste, com suas extremidades pontiagudas. Seu princípio de funcionamento baseia-se no "poder das pontas". De acordo com esse princípio, regiões pontiagudas de uma superfície possuem uma maior densidade superficial de cargas elétricas. O campo elétrico produzido na face externa de um condutor é inversamente proporcional ao quadrado do raio de sua superfície. Sendo assim, como uma região pontuda apresenta um raio pequeno, ao redor de uma ponta o campo elétrico será intensificado. Como a instalação do captor de Franklin se dá em áreas elevadas, como no topo de torres ou em hastes em cima de edificações, sua altura e o intenso campo elétrico ao seu redor funcionam para "atrair" as descargas, fornecendo um caminho mais fácil para a formação do canal. A Figura 2.13 um modelo do captor de Franklin e sua respectiva instalação em uma haste de metal.

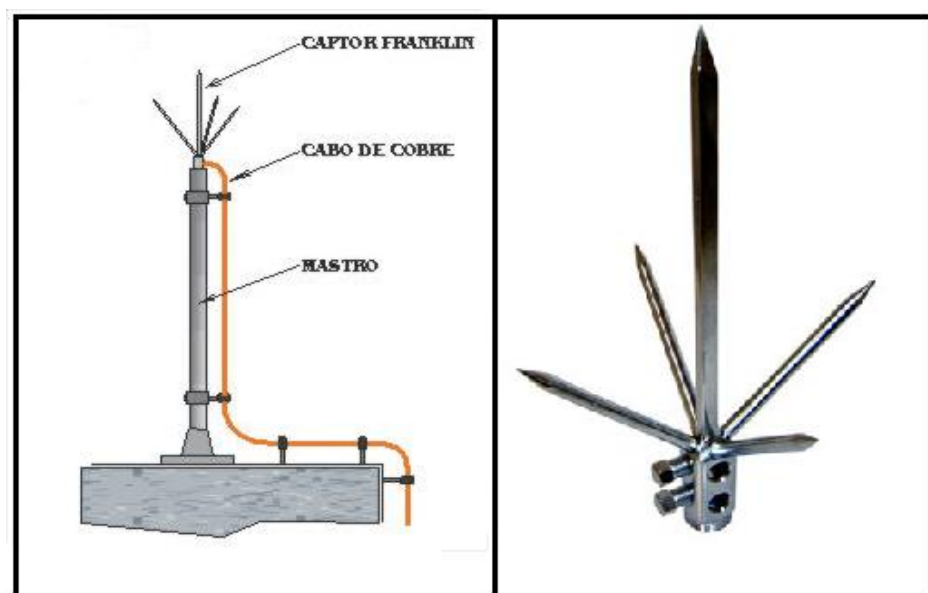


Figura 2.13 – Captor de Franklin instalado [29].

Para o projeto de um sistema de captosres de Franklin, deve-se compreender que uma certa região ao redor do captor terá uma probabilidade nula de penetração de descarga atmosférica. A NBR 5419 denomina essa região como o "volume a proteger", que possui formato cônico com a ponta coincidente ao captor. Além disso, para que a proteção contra a descarga seja efetiva, é necessário que haja um sistema de aterramento conectado à haste, fornecendo um caminho para a descarga se dissipar, sendo que a própria estrutura metálica da edificação pode servir a esse propósito [28].

O outro modelo de SPDA proposto é o da gaiola de Faraday. O próprio nome já indica o princípio de funcionamento. A gaiola de Faraday é um dispositivo condutor, geralmente metálico, que funciona como uma blindagem eletrostática, ou seja, as cargas elétricas se concentram na própria gaiola, enquanto o campo elétrico em seu interior é nulo. Essa afirmação é confirmada pela equação de Maxwell para campos eletrostáticos. Logo, ao se formar uma malha de receptores condutores sobre um edifício, estando todos eles conectados, quando uma descarga atingir um ponto qualquer desse sistema, a região em seu interior estará segura devido à blindagem. A Figura 2.14 ilustra um edifício com um sistema de proteção no estilo gaiola de Faraday.

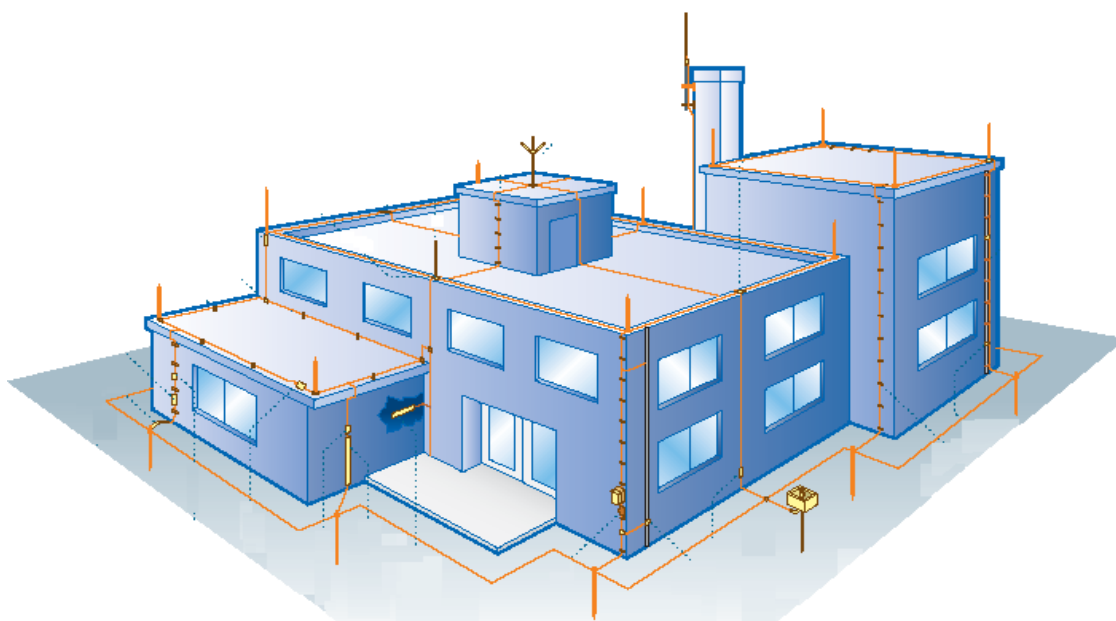


Figura 2.14 – Modelo de SPDA tipo gaiola de Faraday.

A NBR 5419 estabelece todas as condições e parâmetros a serem considerados no projeto e na instalação de um SPDA, inclusive dos dois modelos apresentados. Estima-se que os prejuízos causados por raios no Brasil cheguem a um bilhão de reais por ano [30], sendo que o bom uso de um SPDA e das normas propostas pela NBR 5419 podem ajudar a diminuir esse valor e proteger vidas.

3. DESCARGA ATMOSFÉRICA EM UMA ÁRVORE

A fim de se estudar o assunto principal desse trabalho, que é a avaliação dos efeitos e características de uma descarga atmosférica em um conjunto de árvores que formam uma copa em seu interior, é essencial compreender como se dá esse fenômeno na presença de apenas uma árvore.

3.1. Características de uma árvore

Os estudos que tratam de descargas elétricas atingindo uma árvore costumam analisar a espécie disponível que passou por tal processo. A espécie da árvore estudada sempre varia, de acordo com a região onde o estudo foi desenvolvido, já que a vegetação de um local está diretamente ligada a fatores como clima, latitude, altitude e influência antrópica. Entretanto, apesar da existência de centenas de milhares de espécies de árvores, todas possuem elementos em comum que são suficientes para a análise que busca ser desenvolvida. A Figura 3.1 ilustra uma árvore com indicações de suas divisões.

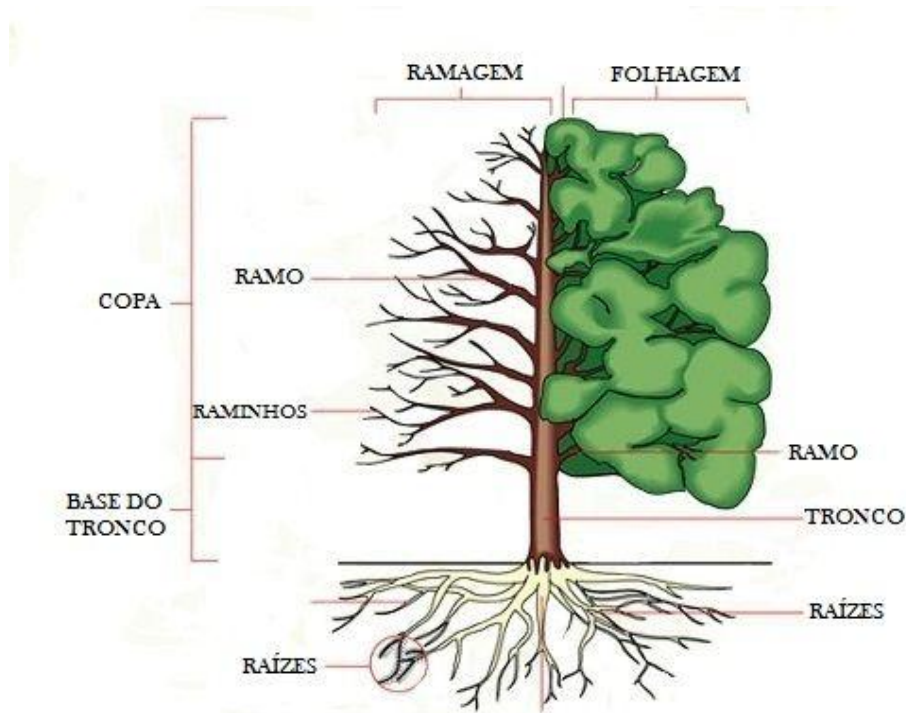


Figura 3.1– Divisão de uma árvore [31].

Os elementos de mais interesse nesse caso são as raízes, o tronco, os ramos (popularmente conhecidos por galhos) e a folhagem.

As raízes são os órgãos que fornecem a sustentação física para o resto da árvore, além de serem responsáveis pela absorção de água e nutrientes presentes no solo que serão utilizados por toda a estrutura da árvore. A característica mais interessante da raiz é que ela é geralmente subterrânea, e como se observa pela Figura 3.1, suas ramificações tomam várias direções, sejam elas paralelas ou perpendiculares ao plano do solo. Devido às suas funções, as raízes tendem a possuir uma grande extensão, apresentando uma área externa muitas vezes maior que a do tronco. É possível que as raízes se estendam por regiões até 4 vezes maiores que o diâmetro das copas [32]. Esse é um fato importante ao se analisar a dissipação da corrente de uma descarga no solo.

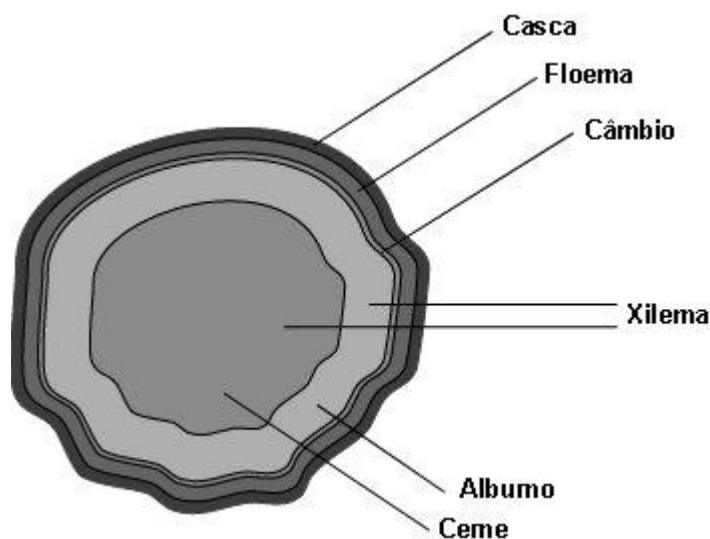


Figura 3.2 – Corte transversal de um tronco de árvore [33].

O tronco é uma estrutura de madeira responsável por erguer as folhas em seu topo para que elas possam ter acesso à luz do sol e realizar o processo de fotossíntese. Sua outra função é transportar a seiva bruta, resultado das substâncias absorvidas pela raiz, para as partes mais altas da árvore. Outro tipo de seiva existente na árvore é a seiva elaborada, que é uma substância aquosa composta por açúcares produzidos pela fotossíntese. A seiva bruta tem sentido ascendente e passa por um

tecido presente no tronco da árvore denominado xilema, enquanto o sentido da seiva elaborada é descendente e é transportada pelo tecido conhecido por floema. Outro elemento que compõe o tronco é a casca, que é uma camada de células mortas responsáveis pela impermeabilização das estruturas interiores. A Figura 3.2 traz um tronco de árvore cortado transversalmente com a indicação de alguns de seus elementos. A região do alburno mostrada também é responsável pela condução de seiva bruta [31].

Como o tronco conecta a parte superior da árvore ao solo, o valor de sua condutividade é um possível indicador da probabilidade da árvore ser atingida por uma descarga atmosférica. A condutividade do tronco depende do tipo de madeira, temperatura e da umidade do ar. Esses aspectos têm influência direta na quantidade de seiva que corre dentro da árvore. Quando maior a quantidade de seiva, maior será a condutividade e conseqüentemente, menor a resistividade [34]. Árvores com pouco conteúdo de seiva em seu interior são menos suscetíveis a serem atingidas por descargas, já que sua resistividade será mais elevada.

Os ramos da árvore são apenas ramificações do tronco de onde saem as folhas. Eles também são canais de transporte das seivas bruta e elaborada.

As folhas, que formam a folhagem, são os órgãos responsáveis pelo processo da fotossíntese, além da transpiração e respiração da planta. A eficiência de todos esses processos citados está diretamente ligada à área da folha, pois quanto maior for a área exposta, maior será a captação de recursos. Dessa forma, é definido o Índice de Área Foliar (IAF), que define a razão entre a área conjunta que as folhas formam e a área do terreno [35].

O conjunto dos ramos com as folhas forma o que se conhece por copa da árvore. Essa região, a depender do tipo de árvore e de seu IAF, é tão densa que aparenta ser uma região verde completamente uniforme, como uma superfície. Quando um conjunto de árvores com essas características se desenvolvem próximas uma das outras existe a chance de elas se confundirem, formando uma extensa superfície de folhagem. Esse fato observa-se bem em florestas densas, como a Amazônica, mostrada na Figura 3.3.



Figura 3.3 – Região com alta densidade de árvores na região amazônica [36].

3.2. Modelagem elétrica de árvores

Como o fenômeno de uma descarga elétrica atingindo uma árvore é de difícil estudo devido a sua imprevisibilidade e dificuldade de localização, é interessante realizar estudos a partir de modelos.

Nos modelos elétricos utilizados em simulações, as árvores são consideradas apenas como caminhos resistivos. Como se deseja normalmente avaliar a corrente que passa através da mesma, esse se torna um modelo simples e muitas vezes eficiente. Vale ressaltar que não existe uma padronização de modelagem elétrica de árvores, cabendo ao autor do estudo a escolha da abordagem.

Na análise de alguns estudos, encontrou-se dois tipos de modelagem. A primeira, encontrada em Gou [37], considera-se cada região da árvore equivale a um resistor, como se confere no modelo da Figura 3.4. Nesse caso, o valor de cada resistor é atribuído de acordo com a condutividade estimada $S [\Omega^{-1}]$ da madeira e das dimensões de cada região. Essa divisão de resistores foi feita por motivos de conveniência para a análise que estava sendo feita, já que cada resistor possui ligação com a vazão de líquidos no interior da árvore.

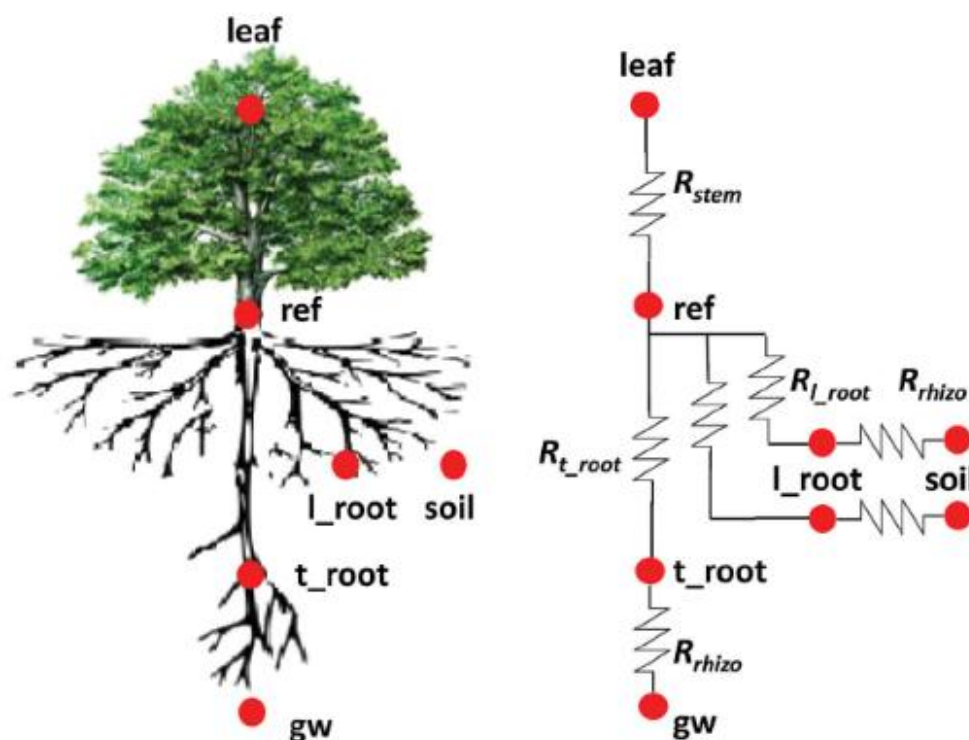


Figura 3.4 – Tipo de modelagem elétrica utilizando resistores [37].

Em outros dois estudos, a modelagem elétrica da árvore foi semelhante. Em Silva [38] e Barannyk [39] são feitas simulações computacionais de uma descarga atmosférica atingindo uma árvore. Em ambos os casos a modelagem é feita utilizando um volume cônico com as medidas aproximadas da árvore estudada e atribuindo um valor de condutividade $S [\Omega^{-1}]$ para a madeira. Esse modelo foi criado dentro do próprio *software* utilizado, não sendo fornecido um valor final para o resistor equivalente. Em Silva, ainda foi acrescentado o mesmo modelo para a raiz, sendo a diferença apenas em sua orientação e no meio em que foi inserido.

Apesar de os três estudos citados utilizarem modelos aproximados, verifica-se que um valor é comum a eles: a condutividade da madeira. Essa grandeza não é tabelada, e para cálculos precisos deve ser medida no material que será estudado. Diversos estudos já mostraram que existe uma relação direta entre o teor de umidade da madeira e sua condutividade [34, 40]. O teor de umidade, por sua vez, depende de diversas características, como a umidade do ar, a temperatura do ambiente, a umidade do solo e até o próprio tipo de madeira. Dessa forma, as medidas de condutividade são

muito variáveis até mesmo dentro de uma mesma espécie de árvore, podendo apresentar diferenças da ordem de 10 a 20% [40]. Uma variação de 50% no teor de umidade da madeira pode causar mudanças na condutividade de até 2 ordens de magnitude [40]. A tabela 3.1 traz alguns valores de resistência para um abeto de Douglas em função de seu teor de umidade.

Tabela 3.1 – Resistência elétrica de uma árvore em função do teor de umidade [41].

Teor de umidade (%)	8	10	12	14	16	18	20	22	24
Resistência [MΩ]	4780	630	120	33	11,2	4,6	2,14	1,10	0,60

Sendo assim, percebe-se que para bons resultados em simulação, é necessário tomar as medidas da condutividade da árvore em análise de acordo com as condições do ambiente, já que o resultado para um dia chuvoso será muito diferente do de um dia seco. Esse fato se verifica muito relevante para o estudo da queda de descargas atmosféricas em árvores, devido ao fato da resistência da madeira influenciar a probabilidade da ocorrência de tal fenômeno.

Por fim, vale citar que existem medidores de umidade projetados especialmente para madeira, que visam oferecer dados mais precisos para análises experimentais. Eles se baseiam na aplicação de uma corrente contínua em apenas dois pontos e medição da resistência elétrica. A partir desses dados, é possível obter um perfil de umidade para o tronco da árvore, como se verifica na Figura 3.5. Nessa Figura, observa-se uma pessoa utilizando um medidor de umidade na árvore para determinar algumas de suas características.



Figura 3.5 – Medição de teor de umidade de árvore a partir de corrente contínua [42].

Por fim, vale citar que existem medidores de umidade projetados especialmente para madeira, que visam oferecer dados mais precisos para análises experimentais. Eles se baseiam na aplicação de uma corrente contínua em apenas dois pontos e medição da resistência elétrica. A partir desses dados, é possível obter um perfil de umidade para o tronco da árvore, como se verifica na Figura 3.5. Nessa figura, observa-se uma pessoa utilizando um medidor de umidade na árvore para determinar algumas de suas características.

3.3. A árvore e as descargas atmosféricas

Muito se divulga sobre o perigo de permanecer próximo a uma árvore durante uma tempestade, pois as árvores "atraem" raios. Apesar de algumas estatísticas comprovarem esse fato, é importante entender o motivo de ele estar correto. A árvore costuma possuir alguns metros de altura, podendo em alguns chegar a mais de 100 metros. Como mostrado no capítulo 2, a descarga atmosférica ocorre quando há a ruptura da rigidez dielétrica do ar. Dessa forma, devido a altura, a árvore encurta a

coluna de ar que deve ter seu dielétrico rompido para a presença da descarga [43]. Logo, é necessário um campo elétrico menor entre a nuvem e o topo da árvore do que a nuvem e o solo [44].

Outro fator que explica a afirmação inicial, é o fato da árvore, apesar de não ser um bom condutor elétrico, ainda apresenta mais condutividade do que o ar [44]. Isso se explica pela presença da seiva no interior de toda a árvore, que é uma substância líquida e rica em minerais e açúcares. Por fim, a árvore pode funcionar como um para-raios. Se seu topo apresentar um aspecto pontudo, o campo elétrico em sua região exterior será mais elevado, facilitando a formação das descargas.

Quando atingida por uma descarga elétrica atmosférica, existem 3 possibilidades do que pode ocorrer com a árvore: ela permanece intacta, pode ter parte da casca de seu tronco removido, ou pode ser totalmente destruída [44].

3.3.1. Árvore intacta

Para uma árvore permanecer intacta após ser atingida por uma descarga atmosférica, é necessário que ela esteja com a casca de seu tronco bastante molhado. Com isso, é oferecido um caminho de menor resistência até o solo para a descarga através do exterior da árvore. Entretanto, apesar do efeito macroscópico da descarga ser imperceptível, é possível que em um âmbito microscópico, as estruturas internas da árvore venham a ser afetadas.

Alguns estudos mostram que árvores atingidas por raios e que não apresentam consequências visuais tendem a morrer após um período de tempo [45, 43]. Como as raízes costumam se estender por uma longa região em contato com o solo, elas são o ponto por onde a corrente de descarga se concentra antes de se dissipar. Dessa forma, é comum que as células das raízes sejam alteradas ou mortas, prejudicando o desempenho de sua principal função, que é absorver os nutrientes do solo. Antes de morrer, a árvore costuma perder muito de seu volume, mas, mesmo assim, em poucos casos é possível atribuir à descarga atmosférica o fato da árvore ter morrido, ainda mais quando não se sabe ao certo o ponto onde a descarga se conectou ao solo.

3.3.2. Perda de casca do tronco

Uma das consequências mais características da descarga atmosférica atingindo uma árvore é a perda de casca ou de madeira. Esse acontecimento se explica pelo fato da descarga percorrer um caminho de menor resistência até o câmbio, região interna do tronco (Figura 3.2), deixando assim uma espécie de cicatriz por onde passou na casca. Quando alcança a região que contém seiva, por se tratar de um líquido, ela alcança temperaturas muito elevadas em um curto período de tempo, evaporando e causando a remoção da casca devido à pressão gerada em seu interior [44]. A depender da profundidade que a corrente de descarga alcança no interior da árvore e de sua intensidade, é possível que seja retirada parte da madeira do tronco. A Figura 3.6 ilustra em forma de desenho como se dão os dois tipos de danos citados.

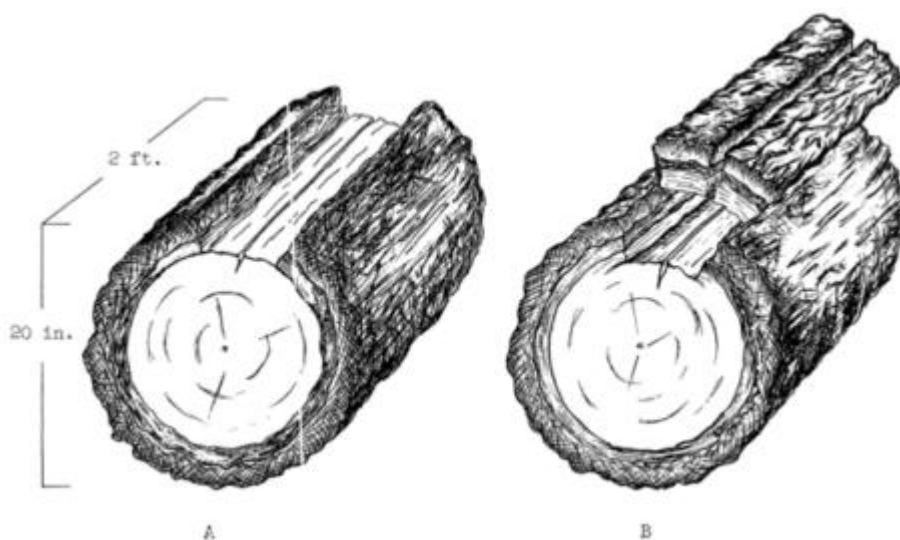


Figura 3.6 – Perda de casca e de madeira em um tronco [46].

Além disso, comumente são criadas rachaduras ao longo do tronco, a depender da pressão interna gerada pela evaporação da seiva. Em sua maioria, as rachaduras deixadas nas árvores e a retirada da casca ou madeira seguem a direção paralela ao tronco, mas é possível que a marca seja em forma de espiral, a depender do caminho que a corrente percorreu [46].

Algumas características determinam o dano que a árvore pode sofrer ao ser atingida por uma descarga: o tipo de madeira, a profundidade da raiz, a quantidade de

seiva contida em seu interior, sua resistência elétrica e a umidade do solo. Entretanto, não é possível prever o tipo de dano que uma árvore experimentará.

A Figura 3.7 mostra uma árvore com uma grande perda de madeira, fato mais incomum. Já a Figura 3.8 ilustra o dano causado por uma descarga atmosférica em uma árvore em Brasília [38], sendo que seu estudo está detalhado no item 3.4. Percebe-se a perda de casca em uma ramificação de galho além de algumas rachaduras.



Figura 3.7 – Perda de madeira em árvore atingida por um raio [47].



Figura 3.8 – Perda de casca de uma árvore em Brasília [38].

3.3.3. Destruição da árvore

Em raros casos, é possível que uma árvore seja destruída ao ser atingida por uma descarga atmosférica. Esse fato está intimamente ligado à quantidade de seiva e

de resinas presentes em seu tronco e raiz. Semelhantemente ao processo de perda de casca, a árvore é destruída quando a descarga atinge camadas mais internas do tronco e faz com que a seiva se aqueça e vaporize, e a pressão gerada é tão alta que causa a total destruição da árvore. As árvores mais susceptíveis a esse fenômeno são os pinheiros e os abetos.

As Figuras 3.9 e 3.10 mostram dois abetos completamente destruídos após serem atingidos por um raio. O primeiro possuía 32 metros de altura e 60 centímetros de diâmetro na base de seu tronco, e estima-se que a descarga apresentou uma corrente de pico no valor 46,8 kA [48]. O segundo abeto apresentava 30 metros de altura e serviu como um condutor descendente para uma corrente de pico no valor 112 kA [48]. É interessante comentar que de acordo com a análise feita por Heidler [48], a explosão da árvore foi tão forte que os fragmentos ejetados causaram danos às árvores vizinhas.



Figura 3.9 – Abeto de 32 metros destruído após ser atingido por descarga atmosférica, na Alemanha [48].



Figura 3.10 - Abeto de 30 metros destruído após ser atingido por descarga atmosférica, na Áustria [48].

3.4. Exemplos de estudos com simulação de descargas em árvores

A fim de apresentar uma análise quantitativa ao fenômeno da descarga elétrica atmosférica em uma árvore, são apresentados os resultados obtidos por Silva [38] em um estudo feito a partir de uma árvore atingida em Brasília, e que causou lesões em 31 pessoas que estavam em uma habitação de alvenaria a 21 metros do centro da árvore. A árvore atingida é a mostrada na Figura 3.7.

Nesse estudo, foi utilizado um método numérico chamado TLM (*Transmission-line modeling method*). O modelo utilizado é apresentado na Figura 3.11. Percebe-se que a árvore foi modelada, como já citado, por um cone preso ao solo, com uma raiz em sua base, que segue em direção ao local onde as pessoas estavam. Ao solo foi atribuído o valor de 0,04 S/m para a condutividade, e à madeira da árvore o valor de 0,001 S/m.

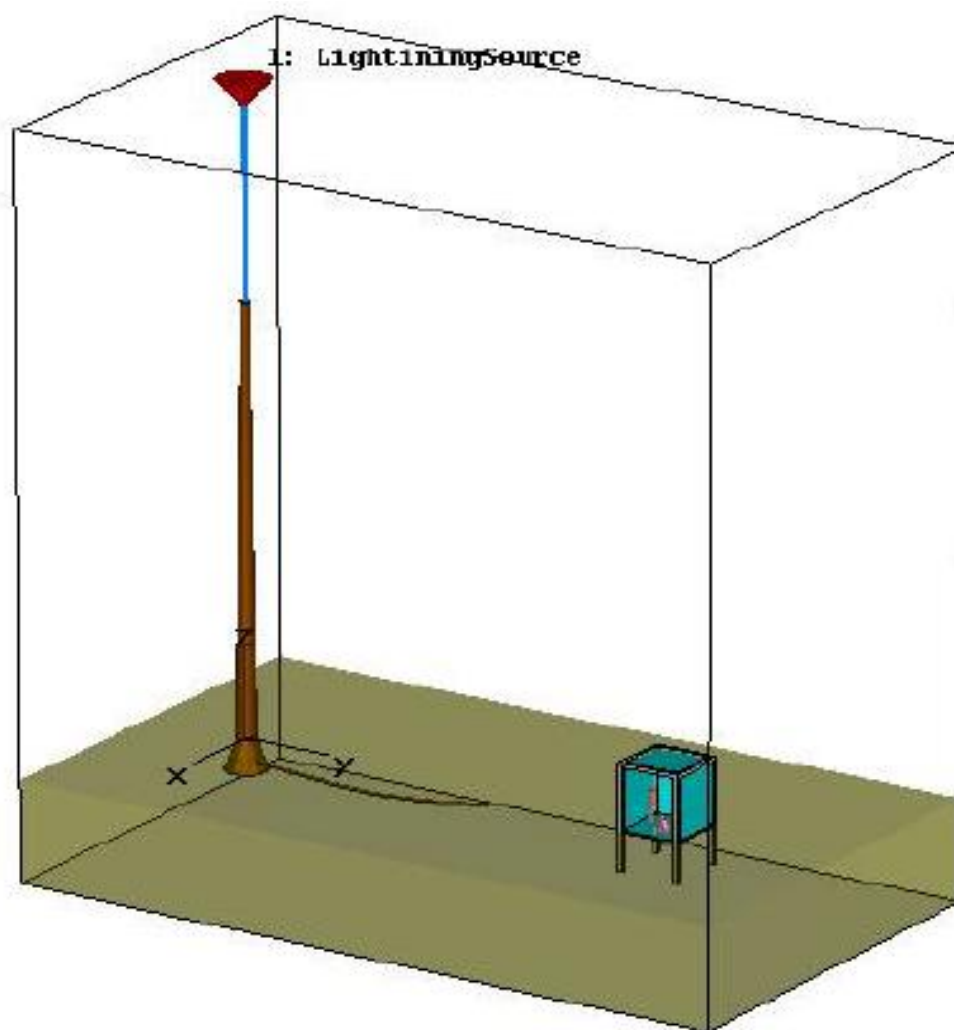


Figura 3.11 – Modelagem do ambiente estudado feita no software CST STUDIO SUITE 2015 [38].

A análise feita foi a corrente que passará pelo corpo de pessoas dentro do alojamento e que estavam em contato com o chão. Para que a corrente passe por um indivíduo é necessário que exista uma diferença de potencial entre duas de suas extremidades, a chamada tensão de passo. Essa tensão é gerada pelo contato dessas extremidades em diferentes curvas equipotenciais, nesse caso, geradas pela descarga percorrendo o solo. Como se observa pela Figura 3.12, foram dispostos três modelos de humanos dentro do ambiente, cada um em uma posição, e todos com monitores de corrente em seus apoios e tórax. Além disso, a análise foi feita simulando uma corrente de descarga de 12 kA e 20 kA, com e sem a presença da raiz. Pela Figura 3.12,

observa-se que o modelo 1 estava em pé em uma posição lateral a árvore, o modelo 2 estava sentado no chão, com o apoio dos pés e mãos, e o modelo 3 estava em pé de frente para a árvore.

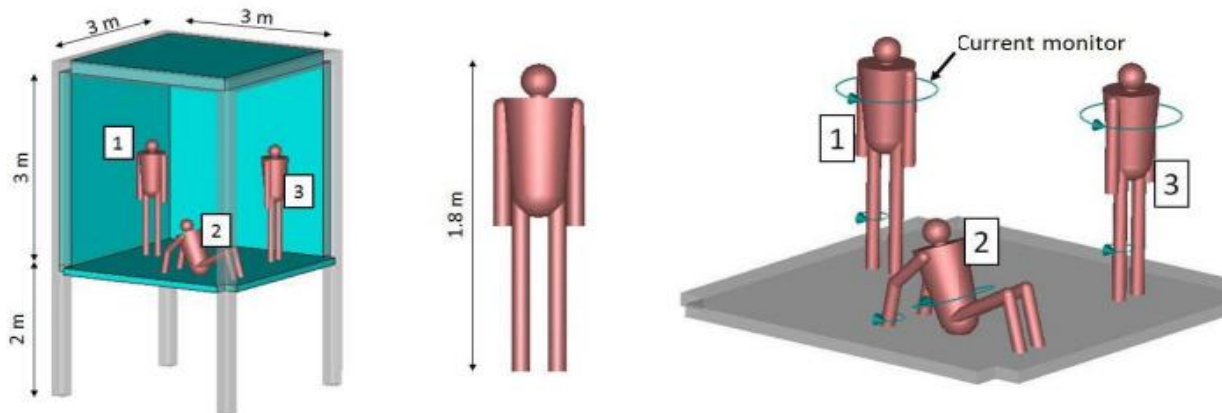


Figura 3.12 - Modelo de humanóides em posições distintas dentro do alojamento simulado [38].

Nos resultados obtidos, constatou-se que a presença da raiz não causou diferenças significativas, mas a esse resultado se atribuiu o fato do tempo estar chuvoso. Entretanto, percebeu-se que a posição do indivíduo na hora da descarga teve influência significativa na corrente que passou por seu corpo. A vítima 1 foi a que mais teve corrente passando por seu tórax, 250 mA no valor de pico, para a corrente de descarga de 20kA. Esse valor foi aproximadamente 250% maior do que o da vítima que menos sofreu, no caso, a que estava em pé e virada de frente para a árvore.

Logo, fica-se constatado que a corrente da descarga atmosférica ao atingir uma árvore, é dissipada no solo e produz superfícies equipotenciais ao redor do centro do seu local de contato, podendo causar danos a pessoas que estão a distâncias consideráveis.

Outro estudo que simulou a descarga atmosférica atingindo uma árvore foi desenvolvido por Barannyk [39], que utilizou o método numérico FMM. Nesse caso, o interesse também era em verificar a corrente que passa por um corpo humano em uma região próxima a árvore. Também foi utilizado um método numérico para a simulação, além da modelagem do local semelhante. O principal resultado obtido foi uma imagem,

apresentada na Figura 3.13, que apresenta como a corrente se distribui em toda a região estudada. É possível perceber que na base da árvore, a corrente de descarga se dissipa radialmente, verificando os fatos já citados.

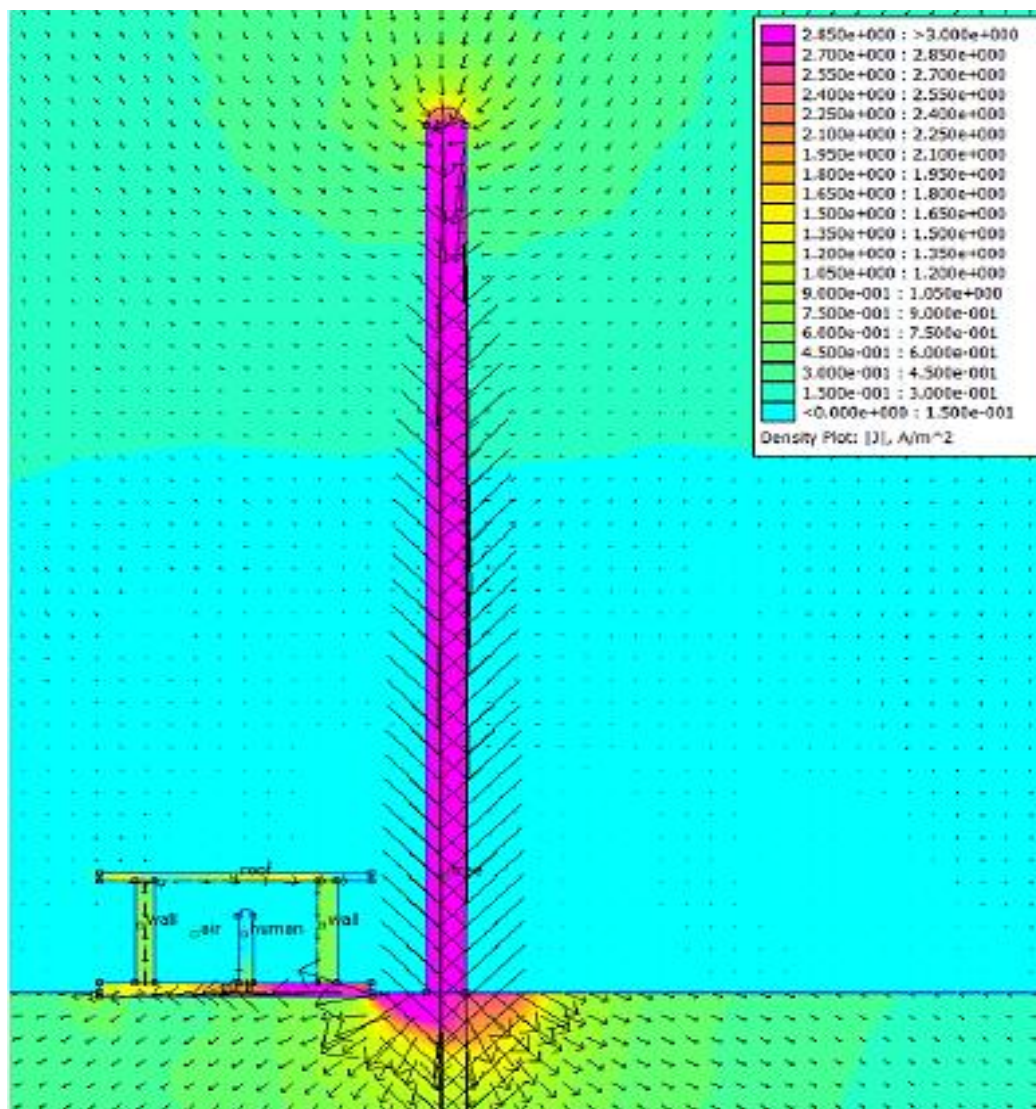


Figura 3.13 – Distribuição de corrente da descarga ao atingir uma árvore [39].

4. DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM UM CONJUNTO DE ÁRVORES

Compreendendo os fenômenos relacionados à uma descarga atmosférica atingindo uma árvore, faz-se o seguinte questionamento: qual o efeito de uma descarga atingindo um conjunto de árvores que formam uma copa densa em sua região superior?

Devido à falta de estudos e pesquisas na área, serão analisados os dados disponíveis acerca do tema, além de propor um modelo baseado em uma comparação com a gaiola de Faraday e analisá-los de maneira qualitativa. Primeiramente, será feita uma revisão bibliográfica do assunto, buscando encontrar informações que possam corroborar com alguma hipótese que será apresentada no modelo.

4.1. Dificuldades de estudo do problema

Antes de iniciar o estudo, é importante expor as dificuldades encontradas. A principal se traduz na falta de material de estudo e pesquisa relacionado ao tema. Enquanto tema central, não foram encontradas publicações que tratem exclusivamente desse assunto. Quando se depara com alguma informação relacionada, ela normalmente se apresenta apenas como um fato observado pelo autor.

Para se analisar uma árvore ou um conjunto de árvores que tenham de fato sido atingidas por uma descarga atmosférica, é necessário saber exatamente o ponto em que houve a conexão nuvem-solo. Os sistemas de detecção, apesar de importantes em diversos aspectos, apresentam uma imprecisão em relação à posição da descarga que pode chegar a alguns quilômetros, dependendo da configuração dos sensores. Logo, deve-se aliar os dados obtidos por detecção e um estudo de campo, para encontrar árvores que apresentem danos aparentes. Como foi avaliado, nem sempre é possível identificar o dano em uma árvore, fazendo com que esse método não esteja sempre certo. Além disso, em muitos casos se depende do efeito do observador, citado por Makela [49], que é caracterizado pela influência do observador na obtenção de resultados relacionados aos danos às árvores.

Para exemplificar a dificuldade exposta, recorre-se aos dados obtidos em Makela [49]. Buscando ligar a posição das descargas atmosféricas com o dano às árvores, analisou-se 104 casos na Finlândia. O estudo se inicia com a coleta de dados do sistema de detecção de descargas atmosféricas do país, o NORDLIS, e então é traçada uma região de possível queda da descarga. Essa região variava na faixa de algumas centenas de metros até alguns poucos quilômetros. Em seguida, observadores eram encarregados de procurar na área delimitada por árvores com que sofreram danos característicos de descargas.

Dos 104 casos estudados em Makela [49], apenas 3 foram identificados sem dúvidas como danos por raios. Em 12, os dados foram obtidos por conversas informais e reportagens na mídia. Em 23, a densidade de raios foi alta a ponto de inviabilizar a identificação do ponto. Em outros 22 casos, foi possível identificar a árvore, mas com alguma incerteza. Por fim, dos 104 casos analisados previamente, apenas foram utilizados os dados de 37, ou seja, 35,57%. Em dois desses casos, foi tirada uma fotografia (Figuras 4.1 e 4.2) da descarga atingindo a árvore. Outro dado interessante é que a acurácia desse processo diminui de acordo com o aumento do valor de pico da descarga [50].



Figura 4.1 – Registro de uma árvore sendo atingida por um raio na Finlândia [49].



Figura 4.2 – Registro de uma árvore atingida por um raio na Finlândia, com descarga lateral [49].

Ainda de acordo com esse estudo, foram deixados de fora da análise 4 casos em que o dano foi observado em um conjunto de árvores próximas, devido à dificuldade de escolha de apenas uma árvore. Esse obstáculo encontrado pelo autor esbarra na primeira dificuldade citada, que é a falta de estudos na área.

Por fim, como um complemento à falta de referências na literatura especializada, estão as dificuldades de simulação. Em apenas dois estudos [38, 39] foram obtidos dados a partir de simulação do problema, sendo que em ambos foi utilizada apenas uma árvore como ponto de contato com o solo. Nesses estudos, além da aproximação de modelos e dados referentes às dimensões do problema e condutividade, observou-se que se requer um alto poder de processamento para problemas simples [38]. Esses aspectos tornam mais difícil a simulação de problemas mais complexos, envolvendo muitas árvores, por exemplo.

4.2. Estudos que abordam o tema

Como mencionado, existem poucos estudos relacionados ao tema desse trabalho na literatura. A partir dos registros encontrados, será feita uma associação de alguma informação com o modelo proposto

A grande maioria dos casos encontrados de uma copa de árvores sendo atingidas por uma descarga atmosférica corroboram o modelo proposto da gaiola de Faraday. Em Taylor [46], vários casos ao redor do mundo são citados em que um grande número de árvores foi danificada ou morta após serem atingidas por um raio. O caso mais marcante é o que um grupo de 100 árvores do tipo Lariço-japonês com 45 anos de idade foram mortas ao serem atingidas por uma descarga atmosférica. Em outro caso, 6 abetos de Douglas de 60 anos de idade foram mortos. O autor também constatou que quando um grupo de árvores é atingido, o dano mais perceptível é encontrado nas árvores mais externas, sendo que algumas dispostas em uma região circular também são afetadas.

Outro estudo que corrobora o modelo da gaiola de Faraday foi desenvolvido por Roeder [51]. O autor constatou que os riscos de um indivíduo ser atingido por uma descarga atmosférica dentro de uma floresta é 12% menor do que o risco de ser atingido em um campo aberto. Uma das proposições da gaiola de Faraday é de que a carga fique disposta nas superfícies condutoras externas, enquanto o campo no interior seja nulo. Apesar de não existir material comprovando explicitamente este fato, acredita-se que no modelo de gaiola de Faraday, possa existir um certo efeito de blindagem no interior das regiões de árvores. A Figura 4.3 mostra a vista aérea de uma floresta onde se observa uma região de árvores mortas por terem sido atingidas em Queensland, na Austrália. Como se observa, ela segue a hipótese da gaiola de Faraday.

Ainda foram observados alguns estudos em que apesar de existirem árvores próximas que satisfaçam as características de entrelaçamento de copas e raízes, o modelo proposto não se encaixa, já que apenas uma árvore do conjunto apresentou o dano característico de uma descarga atmosférica.



Figura 4.3 – Grupo de árvores mortas em meio a floresta devido a uma descarga atmosférica [52].

5. PROPOSTA DE GAIOLA DE FARADAY CONSTITUÍDA POR ÁRVORES

Pela proposta, o modelo é baseado nas semelhanças entre um conjunto de árvores próximas formando uma copa e a gaiola de Faraday. A Figura 5.1 apresenta uma estrutura de gaiola de Faraday, utilizada tipicamente em SPDA, juntamente com um conjunto de árvores destacando os troncos como os condutores de descida.

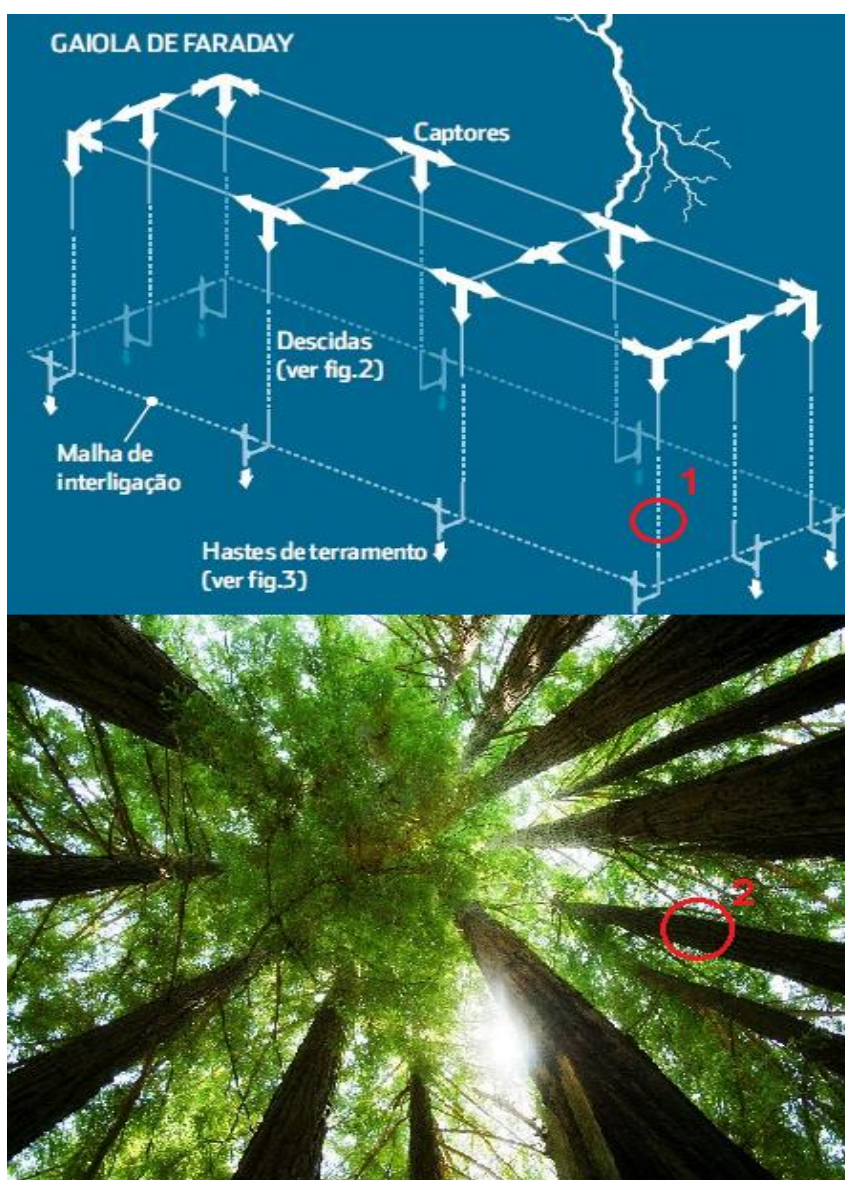


Figura 5.1 – Comparação de uma gaiola de Faraday com um conjunto de árvores [54, 55]. As partes 1 e 2 são os condutores de descida.

Como se observa, é possível atribuir semelhanças entre as duas estruturas, ambas possuem terminal de contato com o solo. Os troncos das árvores são comparados aos condutores de descida, fato que se justifica pela condutividade mais elevada dos troncos. As regiões das copas conectadas se assemelham a uma grande superfície condutora.

De acordo com esse modelo, espera-se que quando a copa for atingida por uma descarga, a corrente de descarga se ramifica entre os galhos e atinja a terra passando por diversos troncos.

Visando melhor compreensão do modelo, é pertinente saber que o SPDA do tipo gaiola de Faraday ainda possui uma malha de aterramento no solo, abaixo da construção. Essa malha de aterramento está prevista na NBR 5419, e tem a função de uniformizar o potencial em toda a área do projeto, buscando baixas resistências de aterramento no espaço entre as hastes [28, 56]. Um exemplo de malha de aterramento se encontra ilustrado na Figura 5.2.

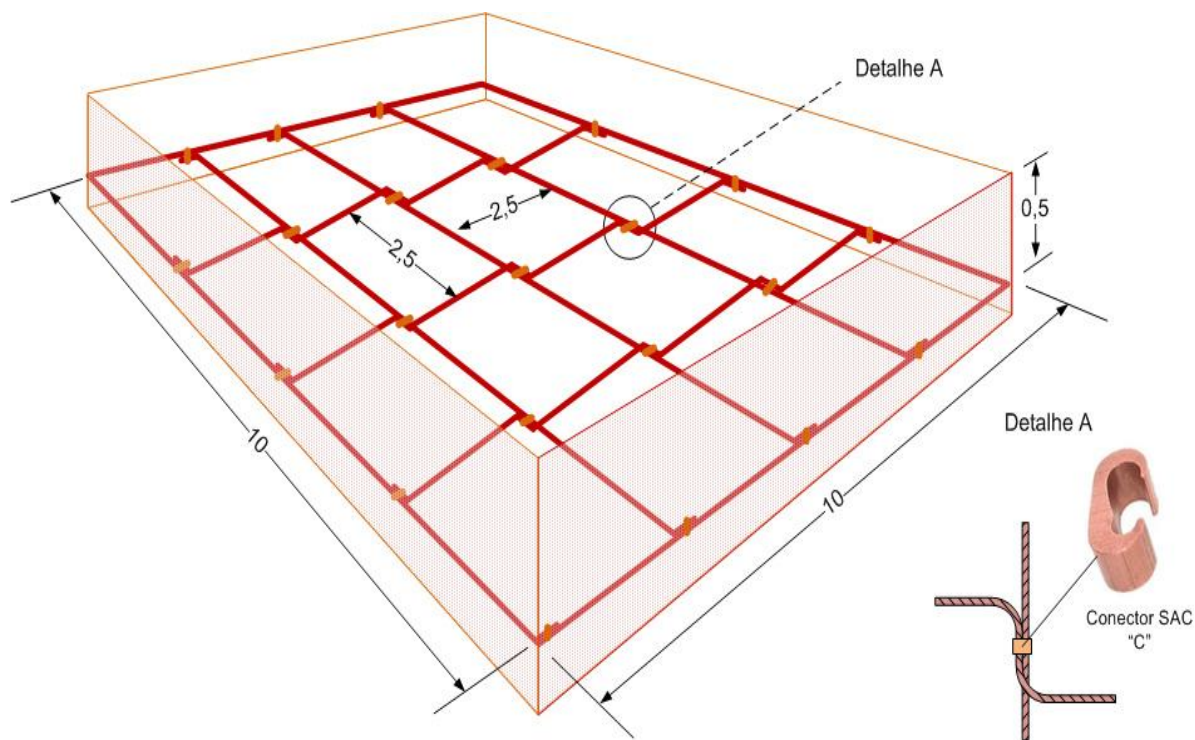


Figura 5.2 – Exemplo de malha de aterramento [57].

Fazendo a comparação com as árvores, as raízes de várias árvores próximas que se entrelaçam dentro do solo são modeladas como a malha de aterramento apresentada, já que toda a madeira da árvore está sendo tida como um condutor. O fato das raízes de árvores diferentes manterem contato é um fato comum, principalmente em conjuntos de árvores próximas. A diferença entre a malha de aterramento de fato e as raízes é que entre a malha e a construção, existe normalmente uma camada de recobrimento [58], como determinado na NBR 15751, que se refere aos sistemas de aterramento de subestações. Essa camada, normalmente de brita, é realizada para proporcionar um maior isolamento entre a malha e um indivíduo, dificultando a presença de tensões de passo mais altas [57].

Como já citado, pessoas próximas a árvores atingidas por descargas elétricas estão sujeitas a perceberem uma corrente passando em seu corpo devido à tensão de passo existente, que nada mais é que a tensão existente entre os dois apoios de uma pessoa [58]. A Figura 5.3 ilustra a tensão de passo definida na NBR 15751. Na Figura, E_p é a tensão de passo, R_{ch} a resistência do corpo humano, R_p a resistência de cada pé e I_{chcd} é a corrente que passa pelo corpo humano.

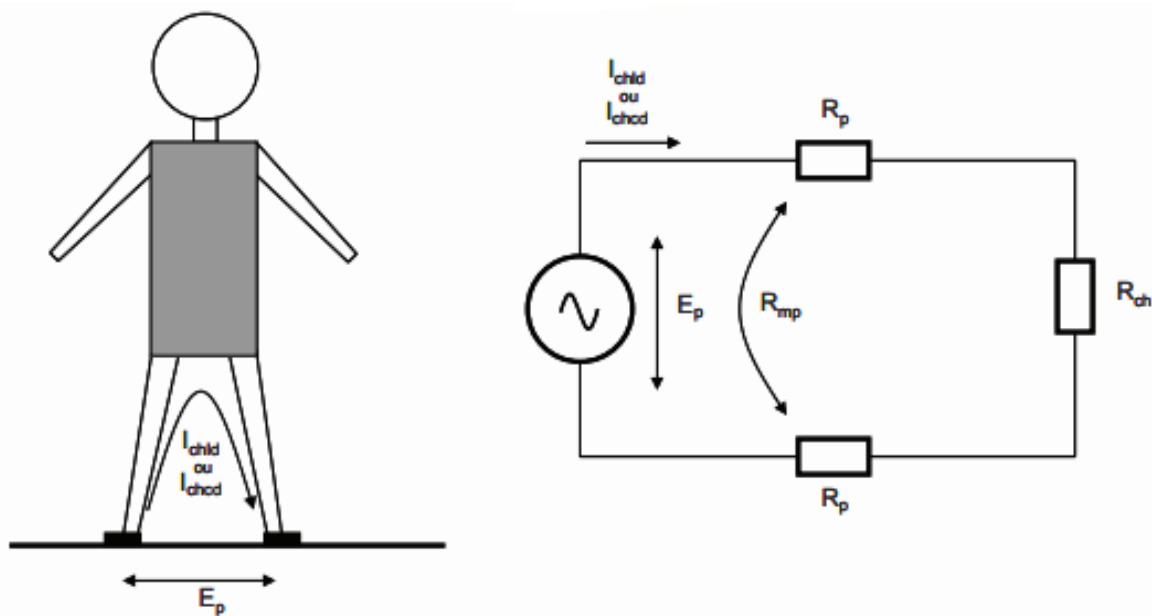


Figura 5.3 – Ilustração da tensão de passo de acordo com a NBR 15751 [58].

Em malhas de aterramento de fato, o projeto é realizado para que essa tensão de passo não cause danos, porém, quando se considera um conjunto de árvores com as raízes entrelaçadas, as diferenças dessas raízes com seus dielétricos podem proporcionar diferenças de potenciais elevadas capazes de causar danos aos seres vivos. Esse fato dependerá também da condutividade do solo, do padrão de entrelaçamento entre as raízes e das próprias categorias das árvores. Adicionalmente, ressalta-se a contribuição da intensidade da corrente de descarga e do teor de umidade da madeira da árvore na composição da tensão de passo.

Na composição da gaiola de Faraday, conforme detalhado na seção 2.8, as copas, os troncos e as raízes das árvores podem ser comparadas, respectivamente, às malhas de cobertura (com suas vigas e lajes), aos pilares e às sapatas (com os tubulões e baldrame) das edificações, como mostradas na Figura 5.4. As ilustrações a seguir fazem a equivalência entre a gaiola de Faraday (metálica) e a gaiola proposta formada por árvores.

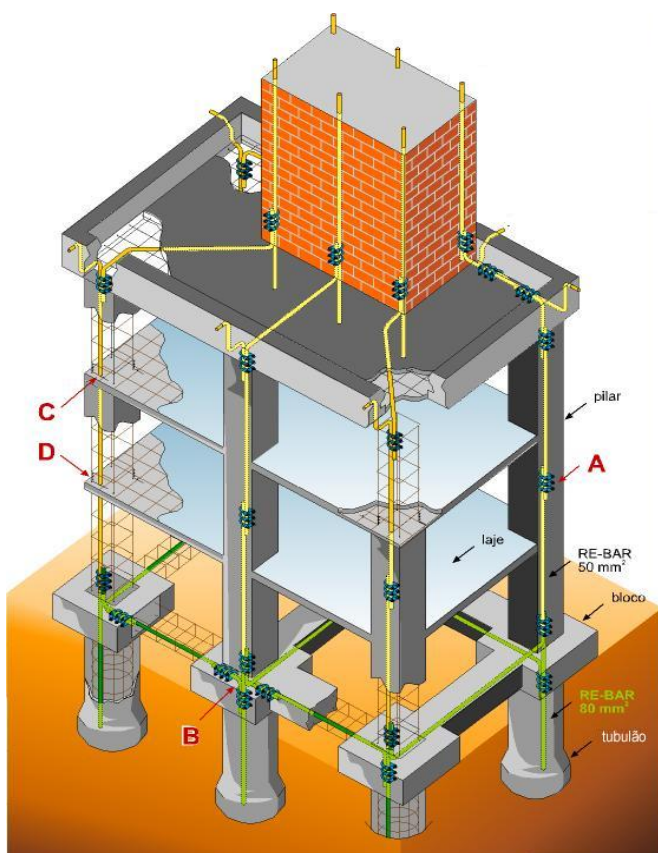


Figura 5.4 – Edifício que utiliza sua estrutura como condutor de descida do SPDA [59].

A Figura 5.5 ilustra um conjunto de árvores próximas formando uma copa em sua região superior, com as raízes entrelaçadas e um indivíduo na região.

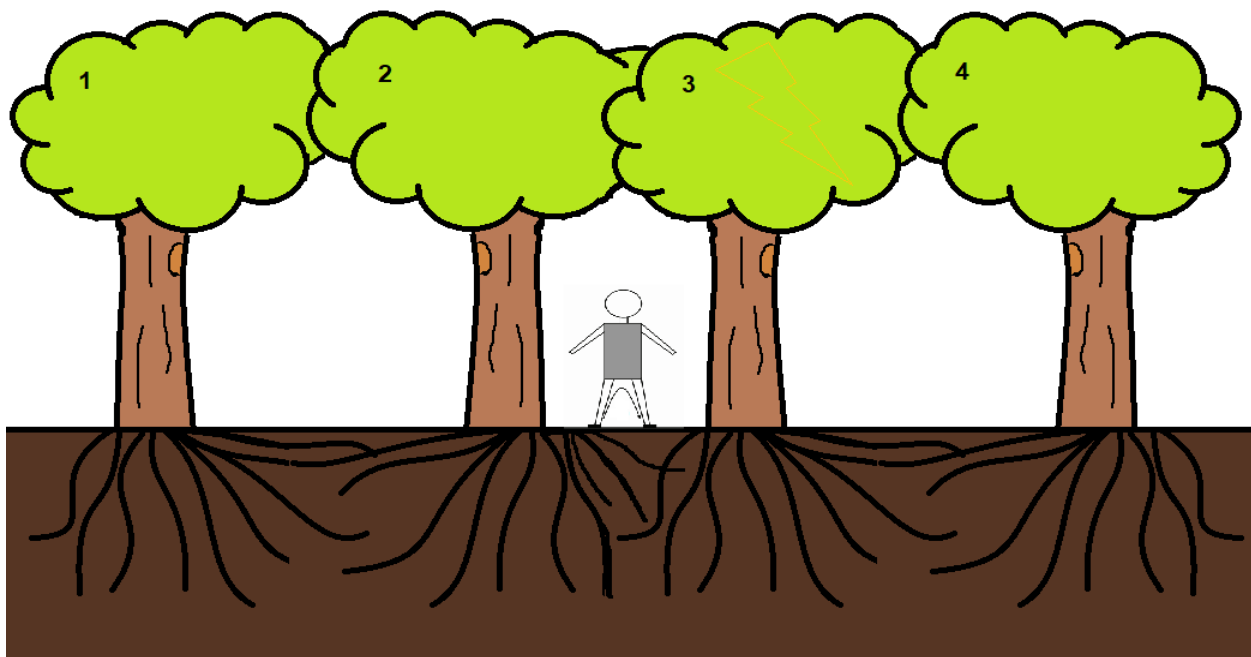


Figura 5.5 – Modelo de conjunto de árvores próximas com uma pessoa no meio.

A princípio pode-se imaginar se a pessoa está protegida entre as árvores. Como explanado anteriormente, a malha criada pelas raízes propicia diferenças de potenciais não constatadas numa gaiola de Faraday metálica.

A Figura 5.6 ilustra um modelo elétrico baseado na Figura 3.4 para duas árvores, constituindo uma gaiola de Faraday com as equivalentes impedâncias, onde:

R_{copa} representando a malha de cobertura;

R_{tronco} representando os pilares;

$R_{\text{raízes}}$ e $R_{\text{rizosfera}}$ representando as sapatas.

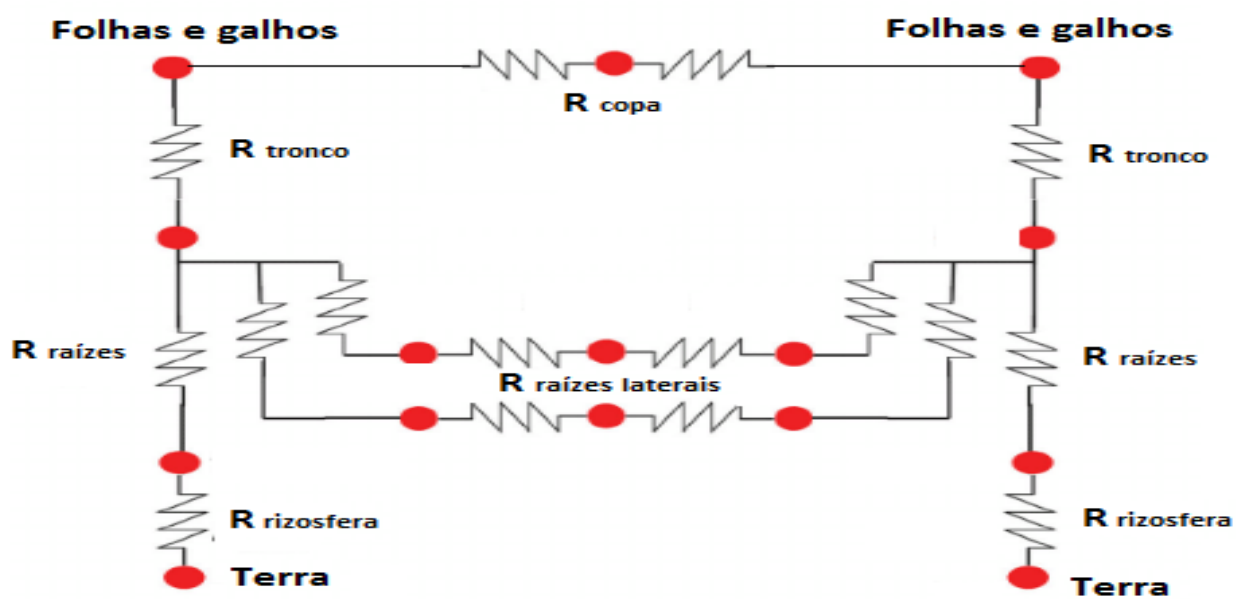


Figura 5.6 – Modelagem elétrica baseada em resistores das árvores 2 e 3 da figura 4.7.

Baseado em [37].

Pela proposta apresentada de uma gaiola de Faraday constituída por um conjunto de árvores, não há proteção contra descargas atmosféricas como esperado para um SPDA.

6. CONCLUSÃO

O fenômeno das descargas elétricas, apesar de já bem conhecido do homem, ainda suscita muitas dúvidas. Muitos estudos foram desenvolvidos buscando explicar desde seu processo de formação até suas características elétricas. Pelo fato de o Brasil ser um dos países que apresentam uma das maiores densidades de raios por metro quadrado, ele se torna um ótimo local de observação e investigação desse fenômeno. Com esse trabalho, propôs-se estudar o fenômeno dos raios associados a árvores e seus efeitos e características ao atingir um conjunto de árvores próximas que formam uma copa densa, de maneira qualitativa, além de propor um modelo baseado no funcionamento da gaiola de Faraday.

Foi proposto um modelo que compara um conjunto de árvores próximas com uma gaiola de Faraday metálica utilizada tipicamente em SPDA. Essa comparação se dá basicamente pelo caráter condutor de árvores perante o canal de descida de raios, que preferem naturalmente as árvores por sua menor resistência em relação ao ar.

Embora tenha sido possível uma comparação entre a gaiola de Faraday de um SPDA e um conjunto de árvores, indivíduos entre árvores, mesmo formando copa fechada, não estão protegidos contra descargas atmosféricas que dão origem a correntes de condução e consequentes tensões de passo.

6.1. Sugestões para trabalhos futuros

- a) Desenvolver modelos detalhados para simulação de descargas atmosféricas em um conjunto de árvores.
- b) Elaborar simulações de descargas atmosféricas em conjunto de árvores com ferramentas, como o TLM e o FMM.
- c) Implementar sensores dedicados para registros de descargas atmosféricas em conjuntos de árvores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **Infográfico - Densidade de raios no Brasil.** Disponível em: <http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/noticias/infografico.densidade.de.raios.no.brasil.php>. Acesso em 15 de junho de 2017.
- [2] **Brasil detém segunda maior área florestal do planeta.** <http://www.brasil.gov.br/meio-ambiente/2012/12/brasil-detem-segunda-maior-area-florestal-do-planeta>. Acesso em 15 de junho de 2017.
- [3] **Florestas do Brasil em resumo.** Disponível em: http://www.florestal.gov.br/snif/images/Publicacoes/florestas_do_brasil_em_resumo_2013_atualizado.pdf. Acesso em 15 de junho de 2017.
- [4] **A estrutura elétrica da atmosfera.** Disponível em: <http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/relamp/electricidade.atmosferica/estrutura.eletrica.da.atmosfera.php>. Acesso em 25 de maio de 2017.
- [5] SADIKU, Matthew N. O. **Elementos de Eletromagnetismo**. 5. ed. Porto Alegre. Bookman, 2012. p 93-223.
- [6] **Tipos de relâmpagos.** Disponível em: <http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/relamp/relampagos/tipos.php>. Acesso em 05 de junho de 2017.
- [7] **Nuvens.** Disponível em: <http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap6/cap6-2.html>. Acesso em 04 de junho de 2017.
- [8] **Formação de nuvens.** Disponível em: <http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap6/cap6-2-1.html>. Acesso em 04 de junho de 2017.
- [9] **What are the different types of lightning?** Disponível em: <https://www.mnn.com/earth-matters/translating-uncle-sam/stories/types-of-lightning>. Acesso em 05 de junho de 2017.

- [10] TAVARES, João Paulo Nardin. **Interação entre a vegetação e a atmosfera para formação de nuvens e chuva na Amazônia: uma revisão**. Estud. av. vol.26 no.74 São Paulo 2012.
- [11] **Tipos de nuvens**. Disponível em: [https://ramonbieco.wordpress.com / 2012/09/03/tipos-de-nuvens/](https://ramonbieco.wordpress.com/2012/09/03/tipos-de-nuvens/). Acesso em 06 de junho de 2017.
- [12] **Cloud eletrification**. Disponível em: [http://www.tau.ac.il/~colin/courses /AtmosElec/Cloud_electrification2013.pdf](http://www.tau.ac.il/~colin/courses/AtmosElec/Cloud_electrification2013.pdf). Acesso em 04 de junho de 2017.
- [13] **Conceitos meteorológicos**. Disponível em: [http://www.inpe.br/webelat /homepage/menu/infor/tempestades/conceitos.meteorologicos.php](http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/infor/tempestades/conceitos.meteorologicos.php). Acesso em 06 de junho de 2017.
- [14] **Why are rain clouds dark?** Disponível em: [https://www.livescience.com /39069-why-are-rain-clouds-dark.html](https://www.livescience.com/39069-why-are-rain-clouds-dark.html) . Acesso em 29 de junho de 2017.
- [15] COORAY, Vernon. **An introduction to lightning**. Springer, Uppsala, Suécia, 2015. p. 7-22.
- [16] VISACRO FILHO, S. **Descargas Atmosféricas: Uma abordagem para a engenharia**. São Paulo: Artliber Editora, 2005.
- [17] **Tipos de relâmpagos**. Disponível em: [http://www.inpe.br/webelat/homepage/ menu/relamp/relampagos/tipos.php](http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/relamp/relampagos/tipos.php). Acesso em 05 de junho de 2017.
- [18] **Corrente elétrica do raio**. Disponível em: [http://www.inpe.br/webelat /homepage/menu/relamp/relampagos/caracteristicas.da.corrente.eletrica.php](http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/relamp/relampagos/caracteristicas.da.corrente.eletrica.php). Acesso em 06 de junho de 2017.

- [19] **What are the different types of lightning?** Disponível em: <https://www.mnn.com/earth-matters/translating-uncle-sam/stories/types-of-lightning>. Acesso em 05 de junho de 2017.
- [20] **Lightning Types and Classifications.** Disponível em: <http://stormhighway.com/types.php>. Acesso em 05 de junho de 2017.
- [21] DANTAS, Rômulo Marucci (2015). **Levantamento prévio de acidentes e danos materiais causados por descargas atmosféricas em edificações no Distrito Federal.** Trabalho de Conclusão de Curso, Publicação, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 84p.
- [22] HEIDLER, F., ET AL. **Parameters of lightning current given in IEC 62305-background, experience and outlook.** Proceedings of 29th Int. Conference on Lightning Protection. 2008.
- [23] **Corrente elétrica no raio.** Disponível em: <http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/relamp/relampagos/caracteristicas.da.corrente.eletrica.php>. Acesso em 06 de junho de 2017.
- [24] **Lightning Science: Five ways lightning strike people.** Disponível em: <http://www.lightningsafety.noaa.gov/struck.shtml>. Acesso em 06 de junho de 2017.
- [25] **Sistemas de detecção.** Disponível em: <https://lightning.nsstc.nasa.gov/primer/primer3.html>. Acesso em 12 de junho de 2017.
- [26] **A Lightning Primer.** Disponível em: <https://lightning.nsstc.nasa.gov/primer/primer3.html>. Acesso em 12 de junho de 2017.

- [27] **Circuito elétrico atmosférico global.** Disponível em: <http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/relamp/electricidade.atmosferica/circuito.eletrico.atmosferico.global.php>. Acesso em 12 de junho de 2017.
- [28] ABNT, NBR. 5419: 2005 – **Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas.** Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).
- [29] **Proteção Franklin.** Disponível em: <http://www.wedtec.com.br/Servicos.htm>. Acesso em 12 de junho de 2017.
- [30] **Infográfico - Densidade de raios no Brasil.** Disponível em: <http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/noticias/infografico.densidade.de.raios.no.brasil.php>. Acesso em 15 de junho de 2017.
- [31] Mário Guimarães Ferri (1977). **Botânica: morfologia externa das plantas (organografia).** [S.l.]: NBL Editora. p. 81. 149 páginas.
- [32] **How wide do tree roots spread?** Disponível em: <http://www.deepproot.com/blog/blog-entries/how-wide-do-tree-roots-spread>. Acesso em 18 de junho de 2017.
- [33] **Anatomia e fisiologia da madeira.** Disponível em: <http://www.oocities.org/tomografiademadeira/madeira.html> . Acesso em 18 de junho de 2017.
- [34] SANTINI, Elio José. **Estimativa do teor de umidade a partir da medição da resistência elétrica da madeira de *Pinus elliottii* durante a secagem em estufa.** Revista Árvore, Viçosa – MG, v. 22, n.2, p.271-277, 1998.
- [35] PONZINI, F.J. 2002. **Sensoriamento remoto na vegetação: Diagnosticando a mata atlântica.** Instituto de pesquisa espacial - INPE.

[36] **Projeto vai coletar dados sobre comportamento de espécies na floresta amazônica.** Disponível em: <https://www.portaldoxingu.com.br/projeto-vai-coletar-dados-sobre-comportamento-de-especies-na-floresta-amazonica/> . Acesso em 18 de junho de 2017.

[37] GOU, Si. **A groundwater-soil-plant-atmosphere continuum approach for modelling water stress, uptake, and hydraulic redistribution in phreatophytic vegetation.** ECOHYDROLOGY, *Ecohydrol*, 2013.

[38] SILVA, Alcides Leandro; ENJIU, Rodrigo K. **Lightning on Tree: Modeling a case study in Brasília, Brazil.** 2015 International Symposium on Lightning Protection (XIII SIPDA), Balneário Camboriú, Brazil. IEEE, 2015.

[39] BARANNYK, Ievgen; SHOSTAK, Volodymyr; TSYBANN, Sergij. **Lightning accidents at the bus stop shelters.** 30th International Conference on Lightning Protection – ICLP 2010.

[40] DARVENIZA, Mat; LIMBOURN, G. J.; PRENTICE, S. A. **Line design and electrical properties of wood.** IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, VOL. PAS-86, No. 11, p. 1344-1356. 1967.

[41] SKAAR, C. **Wood-water Relations.** Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. Chapter 6, p. 207, 1988.

[42] **Instrumentos de medida.** Disponível em: <http://eletronicaqui.com/2016/05/10-instrumento-de-medida/> . Acesso em 19 de junho de 2017.

[43] TAYLOR, A.R. **Lightning Effects on The Forest Complex.** Proceedings: 9th Tall Timbers Fire Ecology Conference 1969.

[44] **Árvores.** Disponível em: <http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/infor/relampagos.e.efeitos/arvores.php> . Acesso em 18 de junho de 2017.

- [45] TAYLOR, A.R. **Lightning and Trees**. In : Golde RH, Ed. *Lightning, Lightning Prot* 1977; vol. 2.
- [46] TAYLOR, Alan R. **Lightning damage to Douglas-fir trees in southwestern Montana**. 1962. *Theses, Dissertations, Professional Papers*. Paper 2846.
- [47] **Trees struck by lightning, w-191-35**. Disponível em: <http://www.weatherscapes.com/photo.php?cat=lightning&id=w-191-35> . Acesso em 20 de junho de 2017.
- [48] HEIDLER, F.; DIENDORFER, G.; ZISCHANK, W. **Examples of severe destruction of trees caused by lightning**. University of the Federal Armed Forces Munich, EIT. 2000.
- [49] MAKELA, Jakke; KARVINEN, Eero; PORJO, Niko; MAKELA, Antti; TUOMI, Tapio. **Attachment of Natural Lightning Flashes to Trees: Preliminary Statistical Characteristics**. *Journal of Lightning Research*, 2009, 1, 9-21.
- [50] MAKELA, Jakke; MAKELA, Antti; HAAPALAINEN, Jussi. **Lightning Location System Accuracy Determined From Strikes to Trees**. 30th International Conference on Lightning Protection - ICLP 2010. Cagliari, Itália. 2010.
- [51] ROEDER, William P. **Is An Open Field Actually Safer From Lightning Than A Forest?** 22nd International Lightning Detection Conference, Broomfield, Colorado. 2012.
- [52] **Stock Photo - QUEENSLAND, AUSTRALIA: A patch of grey dead trees shows where a lightning strike hit the forest**. Disponível em: <http://www.alamy.com/stock-photo-queensland-australia-a-patch-of-grey-dead-trees-shows-where-a-lightning-137420424.html> . Acesso em 25 de junho de 2017.

[53] Covert RA. **Why an oak is often struck by lightning: a method of protection of trees against lightning**. Mon Weather Rev 1924; 492-3.

[54] **Passo 22 no topo das árvores**. Disponível em: <https://grandemeniere.wordpress.com/2013/10/30/passo-22-no-topo-das-arvores/> . Acesso em 25 de junho de 2017.

[55] **Projeto de para-raios SPDA**. Disponível em: <http://www.smconsultoriaempresarial.com.br/o-que-fazemos-consultoria-empresarial/projetos-e-servicos-consultoria-empresarial/projetos-de-para-raios-spda/> . Acesso em 25 de junho de 2017.

[56] FILHO, J. M. **Instalações Elétricas Industriais**. [S.l.]: Ed.8, 2010.

[57] **Sistemas de Aterramento: Projetos e Técnicas de Medição**. Disponível em: <http://www.powerengenharia.eng.br/treinamentosistemas.php>. Acesso em 29 de junho de 2017.

[58] ABNT, NBR. 15751: 2009 – **Sistemas de aterramento de subestações - Requisitos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

[59] **Dicas ajudam a proteger eletrônicos de raios e apagões na rede elétrica**. Disponível em: <http://montal.com.br/ultimas-noticias/item/127-dicas-ajudam-a-proteger-eletr%C3%B4nicos-de-raios-e-apag%C3%B5es-na-rede-el%C3%A9trica.html> . Acesso em 02 de julho de 2017.